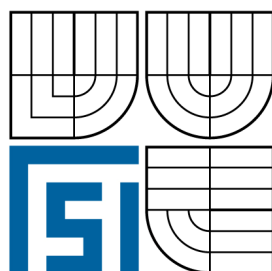


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ZJEDNODUŠENÉ VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ **SPALOVÁNÍ BIOMASY NA ROŠTU**

SIMPLIFIED COMPUTATIONAL MODELLING OF BIOMASS GRATE COMBUSTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KATEŘINA FLOKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. JIŘÍ HÁJEK, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Kateřina Floková

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zjednodušené výpočtové modelování spalování biomasy na roštu

v anglickém jazyce:

Simplified computational modelling of biomass grate combustion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při bilančním modelování roštových kotlů je často nutné odhadovat některé podstatné parametry jako například distribuci vzduchu a recyklovaných spalin do různých zón spalovací komory (pod rošt, nad rošt, do dohořivací oblasti). Modelování kotle s využitím detailního modelu palivového lože však není běžně k dispozici. Proto je hlavním cílem této práce vytvoření a testování zjednodušeného modelu jako nadstavby pro bilanční výpočty v programu Ansys Fluent.

Cíle diplomové práce:

- Seznámení se stavem problematiky výpočtového modelování spalování na roštích
- Sestavení výpočtového modelu experimentálního reaktoru s využitím dat z detailního 1D modelu
- Testování modelu spalování nad ložem a v loži
- Testování různých aproximací pro přenos tepla zářením uvnitř lože
- Testování vlivu adiabatické stěny vs. tepelné izolace
- Vyhodnocení výsledků a sestavení doporučeného postupu pro podobné simulace

Seznam odborné literatury:

1. VAN KUIJK, H. A. J. A. Grate Furnace Combustion: a Model for the Solid Fuel Layer. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 2008, URL: <<http://alexandria.tue.nl/extra2/200810900.pdf>>
2. Yin C., Rosendahl L.A., Kar S.K. Grate-firing of biomass for heat and power production. Progress in Energy and Combustion Science, 34(6), pp. 725-754, 2008

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 23.11.2010

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Abstrakt

Hlavní náplní této diplomové práce je sestavit zjednodušený výpočtový 3D model roštového reaktoru na spalování slámy, který vychází z dat poskytnutých z modelu detailního 1D reaktoru.

Po úvodním přiblížení problematiky z hlediska současného stavu výzkumu v oblasti roštového modelování se hlavní část práce zabývá sestavením výpočtového modelu. V této části se teoretické pozadí řešené problematiky prolíná s popisem výpočtu od stanovení hydraulických ztrát, přes aproximaci dat poskytnutých z detailního 1D modelu, po řešení přenosu tepla během procesu spalování. Poté je provedena rekapitulace postupu v podobě doporučených kroků pro sestavování podobných modelů.

V závěru práce jsou popsány výsledky testování modelu pro přenos tepla zářením uvnitř lože a je analyzován vliv vedení tepla ve stěně reaktoru.

Abstract

The aim of this thesis is to assemble simplified computational 3D model for straw grate combustion, based on data provided by detailed computational 1D model.

This thesis is organized as follows. Firstly, current state of CFD grate combustion modelling is described. The main body of this thesis is focused on creation simplified 3D model, which includes pressure losses calculation, approximation of data provided by outcomes of detailed 1D model and analysis of heat transfer during combustion process. Simulation results dealing with radiation heat transfer and heat conductivity are included in conclusion.

Klíčová slova

výpočetní model, CFD, spalování, biomasa

Key words

computational model, CFD, combustion, biomass

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bibliografická citace

FLOKOVÁ, K. *Zjednodušené výpočtové modelování spalování biomasy na roštu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2011. s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato diplomová práce byla zhotovena pouze mojí osobou bez cizí pomoci. Potřebné informace jsem zpracovala z osobních znalostí, z literatury uvedené v seznamu a z odborných konzultací.

V Brně dne: 26.5.2011

Podpis:

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce, panu doc. Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D., za odborné vedení, za čas strávený nad konzultacemi, za trpělivost při vysvětlování odborné problematiky a za ochotu, se kterou mi poskytoval podklady pro vypracování této práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Tomáši Juřenovi, který mi poskytl data ze své práce, za vstřícnost a pomoc během vypracování. Také bych chtěla poděkovat svým rodičům za jejich veškerou podporu během mého studia.

Kateřina Floková

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	9
1. Úvod	11
1.1. Cíl práce.....	12
2. Zařízení pro spalování biomasy.....	13
2.1. Roštové kotle	13
2.2. Souhrn.....	14
3. Modelování roštových kotlů – přehled literatury	14
3.1. Samostatné modely palivového lože.....	15
3.2. Modelování volného objemu.....	16
3.3. Souhrn.....	16
4. Podstata CFD modelování spalování na roštu	17
4.1. Řídící rovnice pro zjednodušený model 3D reaktoru.....	17
4.1.1. Zákon zachování hmoty	18
4.1.2. Zákon zachování hybnosti	18
4.1.3. Zákon zachování energie	19
4.1.4. Rovnice pro přenos látek.....	19
4.2. Souhrn.....	20
5. Proces spalování obecně	20
5.1. Proces spalování v palivovém loži	21
5.1.1. Sušení.....	21
5.1.2. Devolatilizace.....	21
5.1.3. Spalování koksu	21
5.2. Proces spalování ve volném objemu nad ložem	22
5.2.1. Reakce v plynné fázi	22
5.2.2. Vliv turbulence	22
5.3. Souhrn.....	23
6. Stavba zjednodušeného 3D modelu	23
6.1. Základní předpoklady výpočtu	23
6.2. Tvorba výpočetní sítě.....	25

DIPLOMOVÁ PRÁCE

6.3. Struktura objemových zón	25
6.3.1. Tlaková ztráta na roštu	26
6.3.2. Tlaková ztráta palivového lože	28
6.3.3. Zátka	29
6.3.4. Souhrn	30
6.4. Modelování procesu spalování	31
6.5. Specifikace zón uvnitř lože	31
6.5.1. Aproximace rozměru objemových zón	31
6.5.2. Zdrojové členy	36
6.6. Přenos tepla	37
6.6.1. Přenos tepla kondukcí	38
6.6.2. Přenos tepla konvekcí	38
6.6.3. Přenos tepla radiací	38
6.7. Souhrn	40
7. Doporučený postup pro vytvoření zjednodušeného 3D modelu	41
8. Vyhodnocení výpočtu zjednodušeného 3D modelu	42
8.1. Základní nastavení výpočtového modelu	42
8.2. Vyhodnocení radiace	45
8.3. Vliv vedení tepla stěnou reaktoru	46
9. Závěr	47
10. Seznam použitých zdrojů	48
Seznam příloh	50

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
a_r	částečná absorptance tepelného záření	-
C_2	ztrátový koeficient	m^{-1}
c_p	měrná tepelná kapacita	$J/(kgK)$
c_{pinc}	měrná tepelná kapacita inconelu	$J/(kgK)$
d_{01}	průměr jednoho otvoru v roštu	m
d_p	průměr částice v palivovém loži	m
D	průměr lože	m
D_i	difuzní koeficient i-té složky	m^2/s
e_{char}	energie uvolněná během spalování koksu	W/m^3
e_{evap}	energie potřebná pro odpaření vlhkosti	W/m^3
E	zářivost reálného tělesa	W/m^2
E_0	zářivost černého tělesa	W/m^2
f	průtok vzduchu	$kg/(m^2s)$
f_g	vektor odporu proudění	N/m^3
g	vektoru gravitačního zrychlení	m/s^2
H	výška lože	m
h_{g-s}	konvektivní koeficient přestupu tepla	$W/(m^3K)$
ΔH	reakční teplo	W/m^3
n	počet otvorů v roštu	-
p	tlak	Pa
q	vektor měrného tepelného toku	W/m^2
q_{char}	teplo uvolněné během oxidace	J/kg
q_{latent}	latentní teplo	J/kg
Q_{rad}	tepelná energie záření	W/m^3
r_r	částečná reflektance tepelného záření	-
r_{H_2O}	hmotnostní tok vodní páry	$kg/(m^3s)$
r_{char}	hmotnostní tok koksu	$kg/(m^3s)$
Re	Reynoldsovo číslo	-
S_g	podíl přeměny pevné fáze na plynnou	$kg/(m^3s)$
t_r	částečná propustnost tepelného záření	-
t	čas	s
T	teplota	K
t_G	tloušťka roštu	m

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Symbol	Význam	Jednotka
t_w	tloušťka stěny	m
\mathbf{u}	vektor rychlosti	m/s
u_y	složka vektoru rychlosti	m/s
y	vertikální délková souřadnice	m
Y_i	hmotnostní zlomek i -té složky	-
Symbole řecké abecedy		
α	koeficient permeability	m^2
ε	emisivita reálného tělesa	-
ε_R	emisivita tepelného zdroje	-
ζ	souhrnný koeficient odporu tekutiny	-
ζ_ϕ	dílčí koeficient odporu proudění	-
ζ_{Re}	ztrátový koeficient v závislosti na Reynoldsově čísle	-
ζ_{Iqu}	dílčí koeficient odporu proudění	-
η	dynamická viskozita tekutiny	$Pa \cdot s$
λ_{cond}	tepelná vodivost	$W/(mK)$
λ_{inc}	tepelná vodivost inconelu	$W/(mK)$
λ	vlnová délka	m
ρ	hustota	kg/m^3
ρ_{inc}	hustota inconelu	kg/m^3
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$W/(m^2 K^4)$
τ	smykové napětí	Pa
ϕ	mezerovitost lože	-
ϕ_G	porozita roštu	-
ϕ_Z	porozita zátky	-
Dolní indexy symbolů		
g	plynná fáze	
s	pevná fáze	
Zkratky		
LHV	lower heating value - výhřevnost	
CFD	Computational Fluid Dynamics - výpočtová dynamika tekutin	
UDF	User Defined Function - uživatelem vytvořená funkce	

DIPLOMOVÁ PRÁCE

1. Úvod

Obnovitelné zdroje energie zaujímají v současné poptávce po dodávce energie významné místo. Důvodem nejsou jen dobře známé a často prezentované kladné dopady na životní prostředí, ale také požadavky dohody uzavřené v březnu roku 2007, která zavazuje členské státy Evropské unie pokrývat pětinu celkové spotřeby energie obnovitelnými zdroji [1]. Tato fakta vedou k rostoucímu využívání biomasy ve výrobě energie. Biomasa tvoří 14 % z primárních energetických zdrojů a následuje tak fosilní paliva, ropu a zemní plyn. Pojem biomasa zahrnuje všechna organická nefosilní paliva, která jsou CO₂ neutrální. To znamená, že během celého procesu zahrnujícího jejich pěstování a následné spalování nedochází k navýšení množství oxidu uhličitého v ovzduší. Tímto je dána základní podstata využívání obnovitelných zdrojů. Nyní se zaměříme na úlohu využívání biomasy jak z pohledu paliva jako takového, tak i z pohledu jeho využití. [2]

Pro tento záměr jsou využívány různé druhy biomasy, ať už je to dřevní štěpka dovážená ze zahraničí nebo pěstovaná na zdejších zemědělských plochách jako rychlerostoucí dřevina (což je například vrba, topol nebo akát), nebo jako obilnina či zemědělská rostlina (například ječmen, kukuřice nebo šťovík). Lokální využívání biomasy přímo v místě, kde byla vypěstována, je ve srovnání s těžbou fosilních paliv, která musí být do míst upotřebení dopravována, výhodné. Níže uvedená tabulka (Tab. 1) slouží pro jednoduchou představu o výhodách biomasy nad fosilními palivy. Jsou zde porovnány orientační hodnoty výhřevnosti a popelovin pro biomasu a hnědé uhlí, jako zástupce fosilních paliv. [3]

Srovnání biomasy a fosilních paliv			
	Biomasa		Hnědé uhlí
	Stébelniny	Dřeviny	
LHV	až 18 MJ/kg		14-16 MJ/kg
Popeloviny	4 - 8 %	1 - 3 %	10 - 40 %

Tab. 1: Srovnávací tabulka – biomasa vs. fosilní paliva [1].

Neméně důležitou roli hraje rovněž proces využívání energie z paliva. Spalování se odehrává v kotlích, od nichž je požadována maximální účinnost a výkon. Tyto parametry ovlivňuje několik aspektů, jmenovitě jejich konstrukce, kyslík účastnící se spalování, přívod sekundárního vzduchu, množství a struktura paliva a mnoho jiných. Výrobě kotle se žádoucími parametry předchází řada výpočtů, experimentálních modelů kotlů a počítačových simulací. Výhodou počítačových simulací je jejich schopnost zjistit detailní informace bez nároku na stavbu experimentálních modelů. Pracoviště ÚPEI FSI VUT v Brně se zabývá vývojem simulačního nástroje pro předpověď průběhu spalování v pevném loži kotle. Byl vytvořen matematický model a jeho numerická implementace, která je dále rozvíjena po jednotlivé podprocesy spalování a pro různá paliva. [2]

DIPLOMOVÁ PRÁCE

1.1. Cíl práce

Během bilančního modelování roštových kotlů je často nutné odhadovat některé parametry, jako například distribuci vzduchu a recyklovaných spalin do jednotlivých zón spalovací komory. Nicméně, detailní model lože většinou není běžně k dispozici. Odtud vyplývá snaha mnoha výzkumných pracovišť sestavit modely roštových kotlů.

Detailní 3D modely nejvíce odpovídají reálným podmínkám spalování. 3D modely palivového lože umožňují zkoumat lokální hodnoty nezávislých proměnných (teploty, složení, atd.), stejně jako např. vliv geometrických parametrů částic paliva na proces spalování. Konkrétně např. Yang et al. [4] zkoumá vliv geometrických charakteristik palivového lože na parametry spalování, včetně rychlosti vzplanutí lože či intenzity přenosu tepla v loži (teplotní gradient, který se liší podle velikosti částic tvořících lože). Vytvoření a aplikace detailního 3D modelu pro konkrétní kotel, typ roštu a palivo je nicméně velmi náročné, a proto existují zároveň snahy o vytvoření zjednodušených, např. polo-empirických modelů.

Detailní studie spalování jednotlivých specifických paliv jsou nejčastěji prováděny v dávkových reaktorech, v nichž proudění má charakter pístového toku (tedy 1D). S využitím takto zjednodušené geometrie lože paliva jsou také ověřovány nové detailní modely spalování, mj. model vyvíjený Ing. Juřenou na pracovišti ÚPEI, popsany blíže v kapitole 3.1. Tento detailní 1D model poskytuje informace o hmotnostních tocích jednotlivých látek vznikajících rozkladem paliva během procesu spalování, teplotní údaje a další charakteristiky.

Účelem této práce je vyjít ze současného stavu poznání a využít detailní 1D model jako virtuální laboratorní reaktor a s využitím vypočítaných dat vytvořit zjednodušený semi-empirický 3D model. Výsledkem vyřešení zadané úlohy má být propojení zjednodušeného modelu pevného lože a volného objemu nacházejícího se pod i nad ním. Model, který je prezentován v této práci, umožňuje získat mj. informace o prostorových teplotních nerovnoměrnostech způsobených např. vedením ve stěně reaktoru, jaké není detailní 1D model schopen poskytnout. Dále se od simulace zjednodušeného 3D modelu očekává, že poskytne analýzu variant nastavení výpočtu za účelem minimalizace tepelného toku pod roštem reaktoru.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2. Zařízení pro spalování biomasy

Pro spalování biomasy jsou používány dva základní typy kotlů. Jedná se o zařízení, ve kterých probíhá spalování buď na pevném roštu, nebo ve fluidním loži. Princip fluidního spalování bude nastíněn pouze v několika větech, neboť není předmětem této práce. Popis má sloužit pouze pro stručný přehled.

Při fluidním spalování jsou částice uvedeny do vznosu proudem přiváděného vzduchu. S výhodou se využívá objemu vyplněného např. jemným pískem promíseným s palivem. Mezi výhodami lze uvést schopnost spálit palivo horších kvalit nebo obsahující větší podíl vlhkosti. Další výhodou je například dobře realizovatelné zajištění úplného prohoření paliva, které je udržováno v neustálém pohybu nebo skutečnost, že médium cirkuluje a může tak např. minimalizovat ulpívání popela na stěnách spalovací komory. [2]

2.1. Roštové kotle

Úloha zjednodušeného výpočtového 3D modelu řešeného v této práci se zabývá rozšířenějším druhem spalování, kterým je spalování na roštu. Jednotlivé typy roštu rozdělené podle pohybu, který během spalování konají, jsou pro přehlednost uvedeny v následující tabulce.

Rošt	Hlavní rysy
Nepohyblivý sklopený	Během spalování se palivo posouvá směrem dolů působením gravitační síly. Úhel sklonu je rozhodující, neboť musí být zajištěn posun vyhořelého paliva, avšak při příliš velkém sklonu hrozí příliš velký sesuv paliva a zavalení.
Pohyblivý posuvný	Palivo je doplňováno na jedné straně roštu a během posuvu roštu je spalováno. Na opačné straně roštu je odváděn popel. Ve srovnání s nepohyblivým rostem má tento typ vyšší účinnost, protože je možné ovlivnit tloušťku vrstvy paliva a tím i spálení uhlíkatých sloučenin.
Rošt se střídavým pohybem	Rošt koná střídavě dopředný a zpětný pohyb, na konci roštu je odváděn popel podobně jako u posuvného roštu. Účinnost spalování uhlíkatých sloučenin je vyšší v důsledku lepšího promísení částic paliva.
Vibrační rošt	Rošt koná natřásavý pohyb. Kromě lepší účinnosti spalování uhlíkatých sloučenin má další pozitivum v podobě méně náročné údržby, protože obsahuje méně pohyblivých součástí.

Tab. 2: Rozdělení roštů z hlediska konaného pohybu [2]

Hlavní funkcí roštu je zabezpečit co nejdokonalejší spálení paliva jeho rovnoměrným posuvem a rozvádět primární vzduch vstupující do spalovací komory pod rostem. Za účelem zvýšení výkonu kotle se provádí optimalizace roštu, kdy se hledá nejvhodnější způsob distribuce přiváděného primárního vzduchu nebo největší možné promísení paliva. [2]

DIPLOMOVÁ PRÁCE

V literatuře jsou nejčastěji uváděny kotle s příčným uspořádáním tak, že palivo je plněno do kotle ve směru kolmém na vstup primárního vzduchu. Spodní část objemu paliva je vystavena předeřhřátému vzduchu. Palivové lože je tvořeno velkým počtem částic, vyznačujících se určitou porozitou a je zahříváno tepelnou energií. Tepelná energie je akumulována do vyzdívky kotle a vyzařována zpět do prostoru spalovací komory. Mechanismus spalování bude popsán v následujících kapitolách. [2]

Nad vrstvou paliva bývá umístěn přívod sekundárního vzduchu, který je pomocí trysek rovnoměrně distribuován do objemu spalovací komory. Tento prvek tvoří významný nástroj pro optimalizaci výkonu kotlů a s výhodou se využívá i při rekonstrukci starších zařízení. Pomocí trysek jsou vytvářeny lokální recirkulační zóny, do kterých je přiváděn kyslík. Kyslík poskytuje podmínky pro vhodné prostředí ke spálení látek, které by jinak unikaly ve formě škodlivin. Proces spalování tak pokračuje v již zmíněném volném objemu a účastní se ho plyny uvolněné při spalování v loži včetně malého množství nespálených částic paliva. Trysky sekundárního vzduchu vytvoří rotující proud plynů a prodlouží zdržnou dobu spalitelných částic, zároveň příznivě omezují tvorbu usazenin a omezují vznik koroze vytvářením lokálních oxidačních podmínek. [2]

2.2.Souhrn

V této kapitole bylo krátce přiblíženo uspořádání a druhy roštových kotlů tak, aby bylo možné si vytvořit stručnou představu o roštových kotlích před následující kapitolou, ve které jsou zmíněny konkrétní parametry návrhu a zkoumané charakteristiky spalování, jimiž se zabývá současný výzkum.

3. Modelování roštových kotlů – přehled literatury

Obecně lze modely spalování v kotlích rozdělit na modely experimentální, teoretické a modelování pomocí nástrojů CFD. Výstupem experimentálních modelů bývají naměřená data odpovídající reálně vytvořeným podmínkám, ale je třeba si uvědomit, že samotné vytvoření experimentálního modelu a jeho testování může být nákladné a příliš náročné. Teoretický model bývá spojen s dílčím experimentálním ověřováním. Je zkušenostmi prokázáno a dalšími novými případy znovu ověřováno, že nejvhodnější volbou často bývá využití CFD modelů, které stojí na rozhraní teoretického a experimentálního modelování. Podstata modelování pomocí výpočtové dynamiky tekutin bude nastíněna v kapitole 4. Její široké využití bývá ověřováno reálnými měřeními, která spolehlivost CFD výpočtů potvrzují. [2]

Tato kapitola má poskytnout přehled současného stavu v oblasti modelování spalování na roštu. Některým uvedeným pojmům z problematiky spalování bude věnována pozornost až v následujících kapitolách, avšak pro stručnou představu o úlohách, které jsou pomocí nástrojů CFD řešeny, jsou uvedeny už zde.

Při modelování roštového spalování v kotli se dá jeho objem rozdělit na několik částí, které se navzájem velmi liší z hlediska probíhajících dějů. Modelování roštových kotlů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

lze rozdělit podle (Yin et al., 2008): modelování úplné konverze paliva na roštu, přičemž model popisuje heterogenní proces konverze, a modelování spalování ve volném objemu nad ložem – zde je zkoumáno mísení částic, spalování a tvorba škodlivin během turbulentního spalování plynné fáze. Je obvyklé, že model lože poskytuje vstupní podmínky pro simulaci procesů ve volném objemu. Přeměna paliva během spalování na roštu významně ovlivňuje účinnost celého procesu z důvodu vzniku zuhelnatělých zbytků z nedokonalého spalování, emisí škodlivin a tvorby prachových částic. [2]

3.1. Samostatné modely palivového lože

Tyto modely jsou vytvářeny za účelem rozboru konverze paliva a zahrnují sledování okamžiku vznícení a počátku spalovacího procesu. Vstupní podmínky pro modelování volného objemu tvoří teplota, koncentrace jednotlivých složek paliva a rychlost proudění stanovené na povrchu lože. Následující odstavec obsahuje několik konkrétních příkladů ze současného výzkumného CFD modelování. [2]

Práce Yang et al. [4], zmiňovaná již v kapitole 1.1, se v detailním 3D modelu zabývá výzkumem vlivu velikosti částic paliva na proces spalování ve stacionárním loži. V této práci byl vyvinut numerický model aplikovaný na částice o určité teplotní tloušťce a následně byly pro simulaci nehomogenních charakteristik spalovacího procesu řešeny příslušné rovnice. Vzhledem k různým rozměrovým řadám částic bylo závěrem shledáno, že za současných provozních podmínek dochází k rychlejšímu vzplanutí částic o menších rozměrech. Rychlost hoření je rovněž vyšší u paliva s drobnějšími částicemi, nicméně malé částice se vyznačují užší reakční zónou (ve srovnání s většími částicemi), což vede k vyšším koncentracím oxidu uhelnatého a metanu ve spalínách nad ložem. Oproti tomu se spalování větších částic vyznačuje vyšší teplotou plamene, což vede k vyšší koncentraci vodíku ve spalínách. Větší částice také ovlivňují nestálost samotného procesu spalování, neboť dochází ke kolísání rychlosti hoření po většinu spalovacího procesu.

Zhou et al. [5] se ve své práci zabývá analýzou detailního 1D modelu roštového reaktoru spalujícího slámu, který poskytuje detailní informace o struktuře čela plamene, koncentracích CO a CO₂ na povrchu lože, rychlosti postupu čela plamene a teplotním profilu. Jako charakteristiky mající největší vliv na předpověď průběhu spalovacího procesu v pevném loži jsou označeny efektivní tepelná vodivost, tepelná kapacita slámy a zhuštění palivového lože.

Práce zmíněná v úvodu, ze které je při vytváření zjednodušeného 3D modelu vycházeno, je popsána v publikaci (Juřena et al., 2010). Zabývá se detailním 1D modelem jednoduchého tepelně izolovaného experimentálního roštového reaktoru, řešeným ve výpočtovém programu GRATECAL vyvinutým v prostředí Matlab®. Model a jeho předpoklady vychází zejména ze (Zhou et al, 2005). Palivo představuje pšeničná sláma, která je nahrazena kontinuálním porézním médiem sestávajícím z plynné a pevné fáze. Výpočtový model je variabilní pro různé druhy paliv a různé provozní podmínky. Během simulace jsou uvažovány 4 subprocesy: odpařování vlhkosti z paliva, uvolňování prchavých spalitelných látek, spalování prchavých látek a spalování koksu. Přenos tepla radiací je založen na efektivní tepelné vodivosti, která závisí hlavně na teplotě pevné látky, velikosti částic tvořících lože a porozitě lože. Závěrem je z porovnání dvou variant

DIPLOMOVÁ PRÁCE

pro lože s konstantní a proměnnou porozitou učiněn závěr, že během výpočtového modelování je nutné uvažovat kromě objemové porozity ještě vnitřní porozitu, tvořenou póry ve struktuře paliva. Navazující práce (Juřena et al., 2011) obsahuje různé varianty testované v programu GRATECAL, které mají ověřit zachování hmoty a energie během simulace procesu spalování. [6],[7],[8]

Následující uvedené příklady stručně popisují práce dalších autorů. Prostřednictvím nástrojů výpočtové dynamiky tekutin byl analyzován již provozovaný kotel pro spalování komunálního odpadu v publikaci [9], kde byla lokalizována oblast vznícení, změřena maximální teplota v loži a nalezena oblast fluktuace proudění. V práci [10] byla CFD studie potvrzena měřením teploty a koncentrace složek v kotli na spalování slámy a závěrem byla zjištěna vysoká koncentrace CO a nespáleného uhlíku v polétavém popílku z důvodu nedostatečného promísení jádra proudění se sekundárním vzduchem. Samostatné modely lože dále zkoumají, jaký vliv má složení biomasy na rychlost konverze. V publikaci [11] byl vliv hustoty a velikosti částic paliva na teplotní rozdíl mezi pevnou a plynou fází analyzován v jednorozměrném detailním modelu.

3.2. Modelování volného objemu

Tvorba modelu spalování ve volném objemu nad ložem probíhá následovně. Vstupní podmínky pro modelování jsou vypočteny z hmotnostní nebo tepelné bilance. Další vstupní podmínky jsou získány z výsledků modelování palivového lože. Tyto modely jsou považovány za robustní a jsou využívány pro výpočty průmyslových kotlů. [2], [12]

V publikaci [13] byl tento přístup využit pro vývoj nového zdokonaleného systému pro přívod sekundárního vzduchu v kotli spalujícím odpad, za účelem zvýšení jeho účinnosti. V publikaci [14] vedlo využití CFD simulací a následné zdokonalení rozvodu sekundárního vzduchu pro kotel na spalování dřevní štěpky k 30% snížení emisí NO_x. Prostřednictvím CFD byla zhodnocena zamýšlená modernizace přívodního systému sekundárního vzduchu v analýze, kterou lze nalézt v [15]. Tato modernizace vedla k jednoduššímu uvolňování tepelné energie, prodloužení životnosti spalovacího zařízení a nižším hodnotám emisí škodlivin. Skutečnost, že se změnou intenzity přiváděného sekundárního vzduchu lze vytvořit oblasti se silnější recirkulací a zvýšit turbulenci, což prodlužuje dobu zdržení částic v daném objemu, byla ověřena v [16]. Zde byla analyzována hnací síla částic, jejich prostorové rozložení a pohybová energie na výstupu. V práci, popsané v [17], je uvedeno zjištění, jakým způsobem ovlivňuje poměr přiváděného primárního/sekundárního vzduchu výkon kotle včetně vytvoření modelu předpovídajícího průběh dějů v kotli na spalování odpadů. V [18] lze nalézt studii, která zahrnuje návrh trysek pro recirkulaci spalín a přívod sekundárního vzduchu, zejména se pak zabývá jejich velikostí, umístěním a rychlostí vystupujícího proudu sekundárního vzduchu.

3.3. Souhrn

Cílem této kapitoly bylo poskytnout přehled o současném CFD modelování roštových kotlů, o různé problematice, která se dá pomocí nástrojů CFD řešit a která přispívá ke zvyšování efektivity spalovacího procesu. Na závěr tohoto přehledu různého zaměření výzkumu spalování na roštích lze konstatovat, že zjednodušený 3D model řešený v této

DIPLOMOVÁ PRÁCE

práci má poskytnout informaci o teplotním profilu v objemu spalovací komory, analyzovat rozložení teploty v případě uvažování tepelné vodivosti stěn reaktoru a vyhodnotit šíření radiačního tepelného toku do prostoru pod roštem.

4. Podstata CFD modelování spalování na roštu

Modelování Computational Fluid Dynamics (výpočtová dynamika tekutin) poskytuje nástroj ke znázornění pochodů ve většině energetických zařízení. V případě této práce je výpočtová dynamika tekutin využita k simulaci procesu spalování v kotli. Software CFD (v tomto případě program FLUENT) umožňuje numerické řešení základních fyzikálních rovnic, které popisují zachování hmoty, momentu a energie. Řešením těchto rovnic v několika tisících bodech definovaných na výpočtové síti, vytvořené tak, aby se blížila geometrii modelovaného zařízení, je software CFD schopen simulovat základní děje, například tok tekutin, přenos tepla a chemické reakce. [19],[20]

Rovnice popisující zachování hmoty, momentu a energie lze matematicky popsat soustavou parciálních diferenciálních rovnic. Využitím programu FLUENT lze přenosové rovnice numericky řešit. Výpočetní oblast je nejdříve nadělena na diskrétní konečné objemy pomocí obecné křivočaré sítě, poté přijde na řadu bilancování veličin v jednotlivých konečných objemech a diskretizace, následována řešením diskretizovaných rovnic. Diskretizace představuje aproximaci řídicích rovnic algebraickými výrazy. Pak je proveden výpočet složek rychlosti a hodnot skalárních veličin v geometrických středech konečných objemů. Následně je nutné provést interpolaci za účelem obdržení známých hodnot na rozhraních konečných objemů. [19],[20]

4.1. Řídící rovnice pro zjednodušený model 3D reaktoru

Parciální diferenciální rovnice popisují chování tekutin podle tří základních zákonů – zákonu zachování hmoty, hybnosti a energie. Dalším předpokladem zjednodušeného výpočtového modelování je uvažování ustáleného proudění, které se v uvedených rovnicích projeví nulovými členy obsahujícími časovou složku. Popis rovnic pro idealizovaný 1D reaktor uvedený v této kapitole vychází z publikace [2]. Rovnice pro pevnou fázi nejsou uváděny, neboť je podle [2] předpokládán pouze zanedbatelný pohyb pevných složek. Podrobné rovnice lze nalézt v [21].

DIPLOMOVÁ PRÁCE

4.1.1. Zákon zachování hmoty

Pokud uvažujeme infinitesimální stacionární (ve smyslu nehybný vzhledem k proudící tekutině) kontrolní objem, pak má rovnice kontinuity pro plynnou fázi tvar

$$\frac{\partial(\phi \rho_g)}{\partial t} + \nabla(\phi \rho_g \mathbf{u}_g) = S_g, \quad (1)$$

kde

$\phi [-]$	je mezerovitost lože,
$\rho_g [\text{kg}/\text{m}^3]$	je hustota plynné fáze,
$t [\text{s}]$	je čas
$\mathbf{u}_g [\text{m}/\text{s}]$	je vektoru rychlosti plynné fáze,
$S_g [\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})]$	je podíl přeměny pevné fáze na plynnou.

4.1.2. Zákon zachování hybnosti

Princip bilance sil působících v tekutině vychází z druhého Newtonova zákona, kde je obecně vektor celkových sil roven součinu hmoty a vektoru zrychlení. Účelem je tedy vytvořit součet všech sil působících na infinitesimální nestacionární kontrolní objem. Všeobecně rozeznáváme dva typy působících sil – objemové síly (gravitační) a povrchové síly (způsobené normálovým a smykovým napětím). Vzhledem k poréznímu charakteru média je nutno zahrnout do celkového součtu působících sil ještě odpor porézního prostředí.

Celkový součet pro plynnou fázi vede k

$$\frac{\partial(\phi \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \nabla(\phi \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\phi \nabla p_g + \nabla(\phi \boldsymbol{\tau}_g) + \phi \rho_g \mathbf{g} + \mathbf{f}_g, \quad (2)$$

kde

$p_g [\text{Pa}]$	je tlak v plynné fázi,
$\boldsymbol{\tau}_g [\text{Pa}]$	je smykové napětí v plynné fázi,
$\mathbf{g} [\text{m}/\text{s}^2]$	je vektoru gravitačního zrychlení plynné fáze,
$\mathbf{f}_g [\text{N}/\text{m}^3]$	je vektor odporu proudění v důsledku porézního prostředí.

Jednotlivé členy v tomto pořadí představují součin měrné hmotnosti a zrychlení, konvektivní složku, tlakovou složku, která způsobuje konvekci, viskozni složku, gravitaci a odpor porézního prostředí.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

4.1.3. Zákon zachování energie

Přenos energie probíhá podle prvního termodynamického zákona, čili celková energie systému je neměnná. Pro plynou fázi je rovnice zachování energie vyjádřena jako

$$\phi \rho_g c_{pg} \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + \mathbf{u}_g \nabla T_g \right) = \nabla (\lambda_g \nabla T_g) + h_{g-s} (T_s - T_g) + \Delta H_g + \dot{Q}_{rad,g}, \quad (3)$$

kde

c_{pg} [J/(kgK)]	je měrná tepelná kapacita plynné fáze,
T_g [K]	je teplota plynné fáze,
λ_g [W/(mK)]	je tepelná vodivost plynné fáze,
h_{g-s} [W/(m ³ K)]	je konvektivní koeficient přestupu tepla,
ΔH_g [W/m ³]	je reakční teplo v plynné fázi,
$Q_{rad,g}$ [W/m ³]	je tepelná energie záření pro plynnou fázi.

Rovnice zachování energie pro pevnou fázi je podobně dána

$$\phi \rho_s c_{ps} \left(\frac{\partial T_s}{\partial t} + \mathbf{u}_s \nabla T_s \right) = \nabla (\lambda_s \nabla T_s) + h_{g-s} (T_s - T_g) + \Delta H_s + \dot{Q}_{rad,s} \quad (4)$$

kde

c_{ps} [J/(kgK)]	je měrná tepelná kapacita pevné fáze,
T_s [K]	je teplota pevné fáze,
λ_s [W/(mK)]	je tepelná vodivost pevné fáze,
ΔH_s [W/m ³]	je reakční teplo v pevné fázi,
$Q_{rad,s}$ [W/m ³]	je tepelná energie záření pro pevnou fázi.

4.1.4. Rovnice pro přenos látek

Rovnice pro přenos obecné i -té složky je formulována ve tvaru

$$\frac{\partial (\phi \rho_g Y_{g,i})}{\partial t} + \nabla (\phi \rho_g \mathbf{u}_g Y_{g,i}) = \nabla (\phi \rho_g D_{g,i} \nabla Y_{g,i}), \quad (5)$$

kde

$Y_{g,i}$ [-]	je hmotnostní zlomek i -té plynné složky,
$D_{g,i}$ [m ² /s]	je difuzní koeficient i -té plynné složky.

Do rovnic popisujících přenos jednotlivých látek se dále zahrnuje ještě rychlostní poměr, popisující rychlost přeměny jednotlivých látek v důsledku vypařování, devolatilizace nebo spalování koksu. Tyto rychlostní poměry jsou popsány pomocí diferenciálních rovnic typu ODR (obyčejné diferenciální rovnice), nicméně jejich interpretací se v literatuře nachází mnoho, proto zde nejsou uvedeny. Jejich vyjádření lze nalézt např. v publikacích [5],[21],[22]

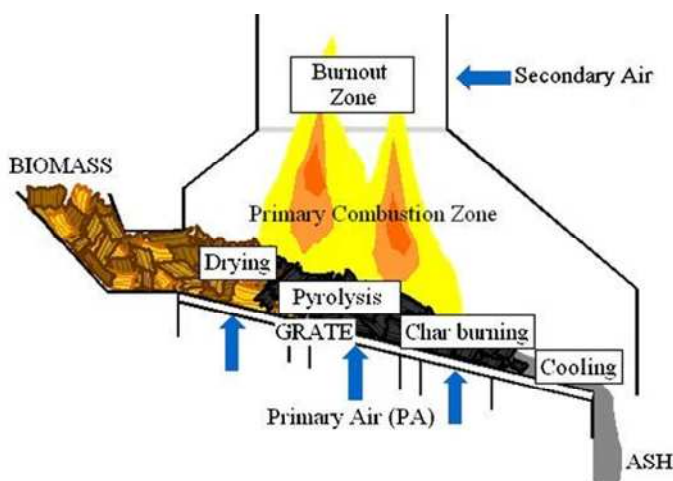
DIPLOMOVÁ PRÁCE

4.2. Souhrn

V úvodu této kapitoly byla nastíněna podstata modelování metodou konečných objemů ve výpočtové dynamice tekutin. Dále byly uvedeny řídicí rovnice zákonů zachování hmoty, momentu a energie pro zjednodušený 3D model, neboť tvoří podstatu procesu spalování a tyto parciální diferenciální rovnice popisující zákony zachování jsou řešeny během simulace procesu spalování ve FLUENTU.

5. Proces spalování obecně

Spalování je obecně popisováno jako exotermní reakce paliva a okysličovadla, kterým je obvykle přiváděný proud vzduchu. Samotný proces zahrnuje fáze, které souvisí se změnami vlastností paliva. Veškerý popis chování v loži paliva začíná okamžikem zapálení, kdy čelo plamene postupuje z povrchu lože směrem dolů, obráceně ke směru proudícího vzduchu. Prostor nacházející se nad vrstvou paliva, ve kterém dochází ke spalování prvků plynné fáze, je označován jako volný objem. Během účinného procesu spalování je žádoucí promísení molekul za vysokých teplot, přičemž mísení a následně tedy i efektivnost spalování významně ovlivňuje turbulence. [2]



Obr. 1: Přeměna paliva během spalování v loži,[2].

(Pozn.: význam angl. pojmů: biomass – biomasa, drying – sušení, pyrolysis – pyrolýza, char burning – spalování koksů, cooling – chlazení, ash – popel, primary air – primární vzduch, primary combustion zone – primární zóna procesu spalování, burnout zone – zóna spálení jednotlivých látek, secondary air – sekundární vzduch)

DIPLOMOVÁ PRÁCE

5.1. Proces spalování v palivovém loži

Vrstva surového paliva začne po zapálení prohořívát ve směru opačném ke směru proudění primárního vzduchu, tedy od shora dolů. Sledovaný objem paliva je možné rozdělit do několika zón podle fáze prohořívání. Na roštu leží vrstva nespáleného paliva, nad ní je oblast, kde dochází k odpařování vlhkosti a palivo se suší. Po vysušení se z paliva začnou uvolňovat prchavé látky jako dehet, metan nebo vodík, tento proces se nazývá devolatilizace. Poté dochází ke spalování koksu během heterogenní reakce ve vytvořené zuhelnatělé vrstvě, přičemž je spotřebováván kyslík. Nad touto zónou je uvažována vrstva vyhořelého paliva. Znázornění popsaného chování je vyobrazeno na Obr. 1, kde jsou jednotlivé fáze spalování uvedeny právě ve zmiňovaném roštovém kotli.

5.1.1. Sušení

Vlhkost je vázána v palivu v kapalně formě dvěma způsoby – prostřednictvím kapilárních sil (uložena v pórech biomasy) nebo prostřednictvím intramolekulárních sil (vázána ve struktuře biomasy). Při zvyšující se teplotě je spotřebovávána energie ve formě latentního tepla na přeměnu kapalně fáze na plynnou a dochází k vypařování vlhkosti.

5.1.2. Devolatilizace

Devolatilizace nastává, když je vlhkost odpařena a palivo je vysušeno. Dochází ke zplyňování paliva za přítomnosti oxidačního činidla (např. vzduchu). [23],[16]
Devolatilizace je popsána jako endotermní proces rovnicemi převzatými z [23]:

Palivo + Tepelná energie \rightarrow Koks + Prchavé látky

Prchavé látky $\rightarrow \alpha$ plyn + β dehet $\rightarrow \gamma_1 \text{CO} + \gamma_2 \text{CO}_2 + \gamma_3 \text{H}_2 + \gamma_4 \text{CH}_4 + \gamma_5 \text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$

kde $\alpha, \beta, \gamma_i, (i=1,\dots,5)$ jsou hmotnostní zlomky složek vznikajících během devolatilizace. Ve zjednodušeném 3D modelu, který je řešen v této práci, je dehet nahrazen sloučeninou kondenzovatelných uhlovodíků označovaných jako $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$.

5.1.3. Spalování koksu

Tvorba koksu přichází na řadu po uvolňování prchavých složek. Během jeho oxidace vznikají oxidy uhlíku CO a CO₂. Reaktivita koksu a tvorba CO a CO₂ nezávisí pouze na vlastnostech biomasy a podmínkách spalování, ale také na minerálním obsahu látky jako je potaš (uhličitan draselný). Jedná se o elektropozitivní chemickou sloučeninu, která je nedílnou součástí každé živé buňky. Potaš má poměrně významný vliv na oxidační proces, protože prudce reaguje s vodou za uvolňování určitého množství tepelné energie, která je dále upotřebena při vznícení vodíku. [2]

Zjednodušený 3D model, řešený v této práci, se nezabývá heterogenními reakcemi v loži a tedy ani podrobným výčtem specifikací nutných pro určení stechiometrických koeficientů pro rovnici spalování koksu, kterou lze nalézt v [5].

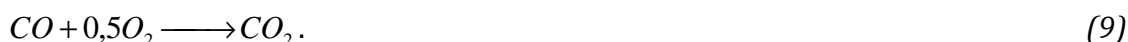
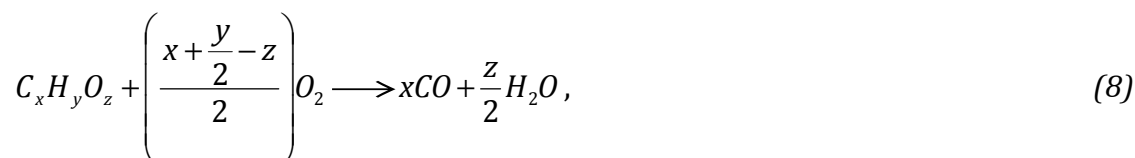
DIPLOMOVÁ PRÁCE

5.2. Proces spalování ve volném objemu nad ložem

Volný objem spalovací komory nad palivovým ložem tvoří oblast, ve které dochází k homogenním reakcím plyných látek vzniklých při konverzi paliva v loži. Pro prostor volného objemu jsou charakteristické podmínky vhodné pro turbulentní spalování, které bude v této kapitole popsáno.

5.2.1. Reakce v plynné fázi

V plynné fázi dochází k oxidaci spalitelných látek, což je vodík, metan, dehet a oxid uhelnatý. Během oxidace spalitelných látek vzniká vodní pára a oxidy uhlíku. Popisy těchto reakcí jsou převzaty ze (Zhou et al., 2005) následovně:



5.2.2. Vliv turbulence

Proces spalování probíhá za podmínek umožňujících vznik turbulentního proudění, jenž závisí na poměru viskozních a setrvačných sil v proudící tekutině. Pokud převládají viskozní síly, označujeme proudění za laminární. V opačném případě dochází v proudícím médiu k fluktuaci vektorových a skalárních veličin (rychlosti, hustoty, teploty, složení směsi), takové proudění je označováno jako turbulentní. Charakter proudění popisuje Reynoldsovo číslo, které představuje zmiňovaný poměr mezi setrvačnými a viskozními silami. Mezní hodnota Reynoldsova čísla, která charakterizuje vznik turbulentního proudění při průtoku prostorem s kruhovým průřezem, je $Re > 2320$. [19],[20]

Fluktuace proměnných veličin proudění má za následek tvorbu vírů o různých velikostech. Největší víry mají velikosti korespondující s geometrickým rozměrem systému a pro jejich pohyb je charakteristická nízká frekvence a vysoký podíl kinetické energie. Tyto víry navzájem interagují a rozpadají se na menší víry, přičemž v konečné fázi je energie nejmenších vírů disipována na teplo. Z hlediska výpočtové náročnosti vyžaduje řešení oblastí s malými rozměry vírů mnohem více uzlových bodů výpočetní sítě než ve srovnání s laminárním prouděním. [24],[25]

Jedním z aspektů, které významně ovlivňují časovou náročnost výpočtu, je časová závislost v Navier-Stokesových rovnicích řešících turbulentní proudění. Zde roste celkový čas potřebný pro výpočet s 4. mocninou Reynoldsova čísla. Z těchto důvodů je aplikace Navier-Stokesových rovnic bez jakýchkoliv úprav na řešení turbulentního

DIPLOMOVÁ PRÁCE

proudění nemožná. Proto se používají různé aproximované přístupy. Například pokud jsou sledovány střední hodnoty turbulentního proudění (průměrná hodnota veličiny se dá rozdělit na její střední hodnotu a flukтуаční složku), lze průměrováním Navier-Stokesových rovnic získat rovnice popisující zákony zachování (energie, hmoty, hybnosti). [24],[25]

5.3.Souhrn

V této kapitole byl podán teoretický základ dějů probíhajících během spalování. V první části této kapitoly byl proveden rozbor jednotlivých subprocesů, které během spalování nastávají v palivovém loži. V druhé části bylo přiblíženo chování ve volném objemu nad ložem, kde dochází k homogenním reakcím a k turbulentnímu spalování. Tímto byl podán základ pro konkrétní řešení zjednodušeného 3D modelu, což je provedeno v následující kapitole.

6. Stavba zjednodušeného 3D modelu

Zjednodušený 3D model vychází z výsledků výpočtu detailního 1D modelu, který je popsán v publikaci [8]. Děje probíhající uvnitř lože budou popsány pomocí zdrojových členů, jejichž hodnoty jsou získány z detailního 1D modelu, který v tomto případě plní funkci virtuálního experimentu. V této kapitole budou nejdříve shrnuty základní předpoklady zjednodušeného 3D výpočtu a data, ze kterých je při modelování vycházeno. Následuje podkapitola věnovaná tvorbě výpočetní sítě. Dále budou vypočteny tlakové ztráty za předpokladu, že odpor jednotlivých částí prostoru spalovací komory vůči proudění se v celém jejich objemu nemění. Následovat bude samotné nadefinování procesu spalování počínaje výpočtem objemových zón v loži, ve kterých jednotlivé fáze spalování probíhají (budou získány z výsledků virtuálního experimentu - detailního 1D modelu), dále definice chemických látek a probíhajících chemických reakcí. V poslední řadě bude věnována pozornost přenosu tepla ve spalovací komoře.

6.1. Základní předpoklady výpočtu

Ve výpočtu zjednodušeného 3D modelu experimentálního reaktoru je předpokládáno:

- ✦ palivo leží na nepohyblivém vodorovném roštu, což je určitý prvek zjednodušení ve srovnání s reálnými roštovými kotly.
- ✦ stacionární děj – ve srovnání s reálnou situací v roštovém kotli uvažuje změny sledovaných veličin jako časově neproměnné. Takový případ si lze představit jako pořízení „snímku“ během procesu spalování, který představuje ustálený děj.
- ✦ proudění tekutiny s vlastnostmi ideálního plynu.
- ✦ homogenní rozložení teploty.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

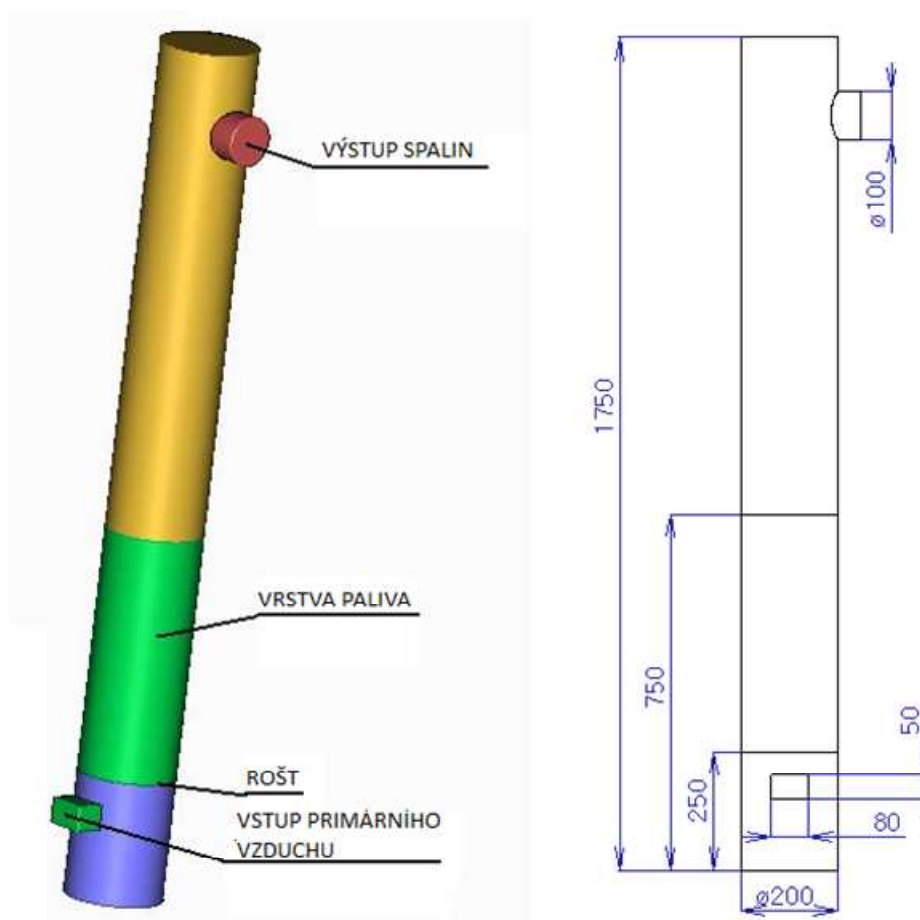
- průběh spalování v palivovém loži popsán pomocí dat zdrojových členů, která byla vypočítána detailním 1D modelem popsaným v publikaci Ing. Juřeny [8].
- převzetí vstupních dat (průtoku vzduchu, teploty a složení vzduchu, vlastností roštu a lože atd.) z práce Ing. Juřeny, popsané v publikaci [8]

Vlastnosti primárního vzduchu, ze kterých se při výpočtu zjednodušeného 3D modelu vychází, jsou uvedeny v Tab. 3.

Orientační rozměry spalovací komory, vycházející z práce [26], jsou uvedeny na Obr. 2. Ostatní data, například složení dehtu nebo charakteristické parametry roštu, budou uvedeny v souvislosti s řešenou problematikou později přímo v textu.

Vlastnosti primární vzduchu			
Parametr	Jednotka	Hodnota	Popis
T	K	298,15	Teplota vzduchu
f	kg/m ² /s	0,15	Průtok vzduchu
O ₂	kg/kg	23,3	Koncentrace kyslíku
N ₂	kg/kg	76,7	Koncentrace dusíku

Tab. 3: Vstupní podmínky výpočtu



Obr. 2: Základní parametry výchozího 3D modelu

DIPLOMOVÁ PRÁCE

6.2. Tvorba výpočetní sítě

Pomocí software GAMBIT jsou v modelu vytvořeny oddělené zóny, ve kterých se odehrávají jednotlivé subprocessy (sušení, devolatilizace a spalování koksu) a poté je vygenerována objemová síť. Výpočet jednotlivých zón bude vysvětlen v kapitole 6.5.

V celém objemu reaktoru bylo vytvořeno celkem 38 660 kontrolních objemů. Hustota výpočetní sítě a počet elementů hraje velkou roli z hlediska časové náročnosti výpočtu, proto je vhodné mít v modelu nízký počet kontrolních objemů, avšak s ohledem na kvalitu výpočetní sítě. Čím je výpočetní síť jemnější, tím je výpočet přesnější – ovšem jemnější síť mají obvykle větší počet buněk a konvergence modelovaných výsledků trvá déle a vyžaduje více dat. Uvádí se, že jedna objemová buňka vzhledem k náročnosti na paměť RAM zabírá 1-2 kB. Žádoucí je, aby síť obsahovala hexahedrické buňky (v řezu obdélníky), neboť degenerované buňky (tj. takové, jejichž vrcholový úhel se blíží 180°) způsobují příliš velké numerické chyby výpočtu. Z hlediska složitosti výpočtového modelu se jedná o velmi jednoduchý model, neboť se zde nevyskytují žádné náhlé změny geometrie. [19]

6.3. Struktura objemových zón

Palivo představuje objem vyplněný částicemi partikulární látky. Přestože mezi částicemi dochází ke vzájemnému kontaktu, existuje vždy volný objem, který je vyplněn proudící tekutinou. V tomto případě se jedná o homogenní tekutinu (plyn – primární vzduch), lze tedy hovořit o jednofázovém toku porézní přepážkou. Při průtoku reálné tekutiny porézní překážkou dochází vždy k poklesu tlaku ve směru proudící tekutiny o hodnotu Δp . [27]

DIPLOMOVÁ PRÁCE

6.3.1. Tlaková ztráta na roštu

Výpočty roštu vychází z Darcyho zákona, který vyjadřuje závislost rychlosti proudění na rozdílu tlaků v tekutině. Darcyho zákon připouští pouze stacionární proudění, což odpovídá vstupním podmínkám tohoto zjednodušeného výpočtu. Rošt je tvořen perforovaným plechem o tloušťce 10 mm. Lze jej tedy charakterizovat jako pevné těleso s charakterem porézního media, které je určeno mezerovitostí a velikostí otvorů uvedených v Tab. 3, převzatých podle (Yang et al., 2005). Dle vztahu (10) podle [28] je pomocí Reynoldsova čísla ověřen předpokládaný laminární charakter proudění v objemu roštu a následně jsou pomocí empirických vztahů z literatury [28] stanoveny koeficienty pro výpočet ve FLUENTU [22].

Základní parametry roštu			
Parametr	Jednotka	Hodnota	Popis
ϕ_G	-	0,07	Porozita
d_{o1}	m	0,002	Průměr jednoho otvoru
t_G	m	0,01	Tloušťka roštu

Tab. 4: Základní parametry roštu

$$Re = \frac{fD^2}{nd_{o1}\eta} \quad (10)$$

kde

n [-]	je počet otvorů v roštu,
d_{o1} [m]	je průměr jednoho otvoru v roštu,
η [Pa s]	je dynamická viskozita proudící tekutiny.

Výpočet tlakové ztráty je proveden dle Idelchika [28]

$$\Delta p = \zeta \rho \frac{u^2}{2}, \quad (11)$$

kde ζ je souhrnný koeficient odporu tekutiny. Ten je stanoven pomocí empirické rovnice na základě vztahu z [28] jako

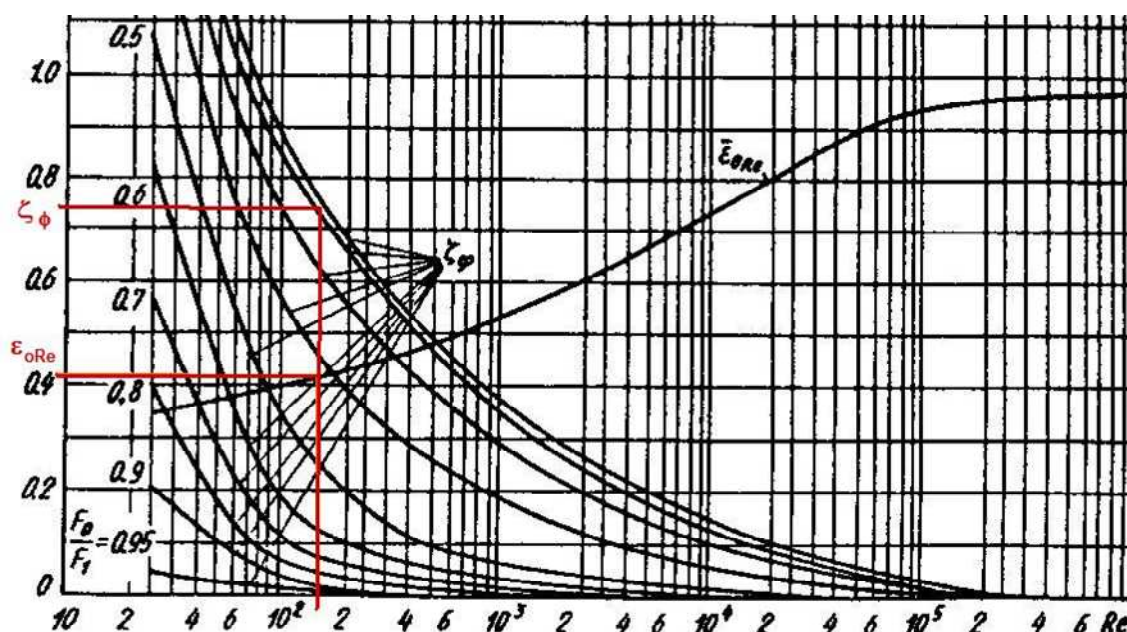
$$\zeta = \zeta_\phi \frac{1}{\phi_G^2} + \varepsilon_{0Re} \zeta_{1qu}, \quad (12)$$

kde

ϕ_G [-]	je porozita roštu
ζ_ϕ [-]	je dílčí koeficient odporu proudění,
ε_{0Re} [-]	je ztrátový koeficient v závislosti na Reynoldsově číslu,
ζ_{1qu} [-]	je dílčí koeficient odporu proudění.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Z diagramu na Obr. 3 je odečten koeficient ζ_ϕ , když $\zeta_\phi = f_1(\phi_G, Re)$ a koeficient ε_{0Re} , když $\varepsilon_{0Re} = f_2(Re)$.



Obr. 3: Diagram ztrátových koeficientů v závislosti na porozitě a Reynoldsově čísle [28]. Parametr $F_0/F_1 = \phi_G$ na svislé ose diagramu.

Dílčí koeficient odporu proudícího média ζ_{1qu} je dán rovnicí

$$\zeta_{1qu} = (0,707\sqrt{1-\phi_G} + 1 - \phi_G)^2 \frac{1}{\phi_G^2}. \quad (13)$$

Nyní je znám souhrnný koeficient odporu tekutiny a lze stanovit tlakovou ztrátu, přičemž rychlost proudícího vzduchu je určena z podílu průtoku a hustoty média.

Ve FLUENTU je využit model pro tzv. porézní přepážku, který je odvozen od modelu porézního objemového média (bude popsáno později v kapitole o palivovém loži). Potom je tlaková ztráta založená na Darcyho zákonu, zahrnující také přídatný inerciální ztrátový koeficient a permeabilitu, určena jako [22]

$$\Delta p = -\left(\frac{\eta}{\alpha} u_y + C_2 \frac{1}{2} \rho u_y^2\right), \quad (14)$$

kde

u_y [m/s]	je složka rychlosti ve směru proudění,
α [m ²]	je koeficient permeability,
C_2 [m ⁻¹]	je ztrátový koeficient.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tloušťka roštu má geometricky nulovou hodnotu, její skutečná hodnota je jí přiřazena až v programu FLUENT, kde je zobrazena jako rozhraní dvou objemů (prostoru pod roštem a objemu čerstvého paliva ležícího na roštu). Tloušťka roštu je rovněž zohledněna ve výpočtových koeficientech α a C_2 . [22]

Při známé tlakové ztrátě lze přistoupit k výpočtu koeficientu permeability a koeficientu inerciálních ztrát dle vztahů získaných z [22]. Koeficient inerciálních ztrát C_2 je stanoven jako podíl dle (15)

$$C_2 = \frac{\zeta}{t_G}, \quad (15)$$

kde t_G označuje tloušťku roštu a koeficient permeability je vyjádřen vztahem

$$\alpha = \frac{\eta u}{\frac{\Delta p}{t_G} - \frac{C_2 \rho u^2}{2}}. \quad (16)$$

Nyní jsou získány všechny hodnoty potřebné pro nastavení roštu jako porézní přepážky ve FLUENTU.

6.3.2. Tlaková ztráta palivového lože

Při výpočtu je simulován proces spalování v loži tvořeném vrstvou slámy. Protože je struktura takového paliva velmi složitá, je nahrazena objemem vyplněným kulovými částicemi s danou mezerovitostí, jejichž parametry jsou uvedeny v Tab. 5. Hodnoty uvedené v Tab. 5 jsou převzaty dle (Yang et al., 2005).

Základní parametry lože			
Parametr	Jednotka	Hodnota	Popis
D	m	0,2	Průměr lože
H	m	0,5	Výška lože
ϕ	-	0,58	Porozita
d_p	m	0,004	Průměr částice

Tab. 5: Základní parametry palivového lože

Obdobně jako u roštu se rovněž jedná o objem porézního charakteru. Za předpokladu, že se jedná o průchod laminárního proudění zaplněným objemem o určité výšce, je využito rovnic pro výpočet koeficientů permeability a inerciálních ztrát dle [22] následovně:

$$\alpha = \frac{D^2 \phi^3}{150(1-\phi)^2}, \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{3,5(1-\phi)}{D \phi^3}. \quad (18)$$

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pro úplnost informací a srovnání s parametry roštu je dopočtena tlaková ztráta dle vztahu [22]

$$\Delta p = L \frac{150\eta(1-\phi)^2}{D^2\phi^3} u. \quad (19)$$

6.3.3. Zátka

Při výstupu spalin na vrcholu spalovací komory je proud vzduchu nucen prudce měnit směr kolmo na dosavadní směr stoupání. Dochází zde ke vzniku zpětného proudění. Aby byl výpočet numericky stabilní a byl dodržen záměr vytvořit 3D model reálného laboratorního 1D reaktoru, byly objemu na výstupu ze spalovací komory přiřazeny vlastnosti porézní vrstvy, která sníží rychlost proudění a usměrní tok proudu. Pro výpočet koeficientů α a C_2 byly využity rovnice (19), (20). V Tab. 6 je uvedena zvolená porozita a výška zátky, stejně jako průměr převzatý z rozměrů spalovací komory dle [26].

Základní parametry zátky			
Parametr	Jednotka	Hodnota	Popis
D_z	m	0,1	Průměr výstupu spalovací komory
H_z	m	0,1	Výška zátky
ϵ_z	-	0,6	Porozita objemu zátky

Tab. 6: Základní parametry zátky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

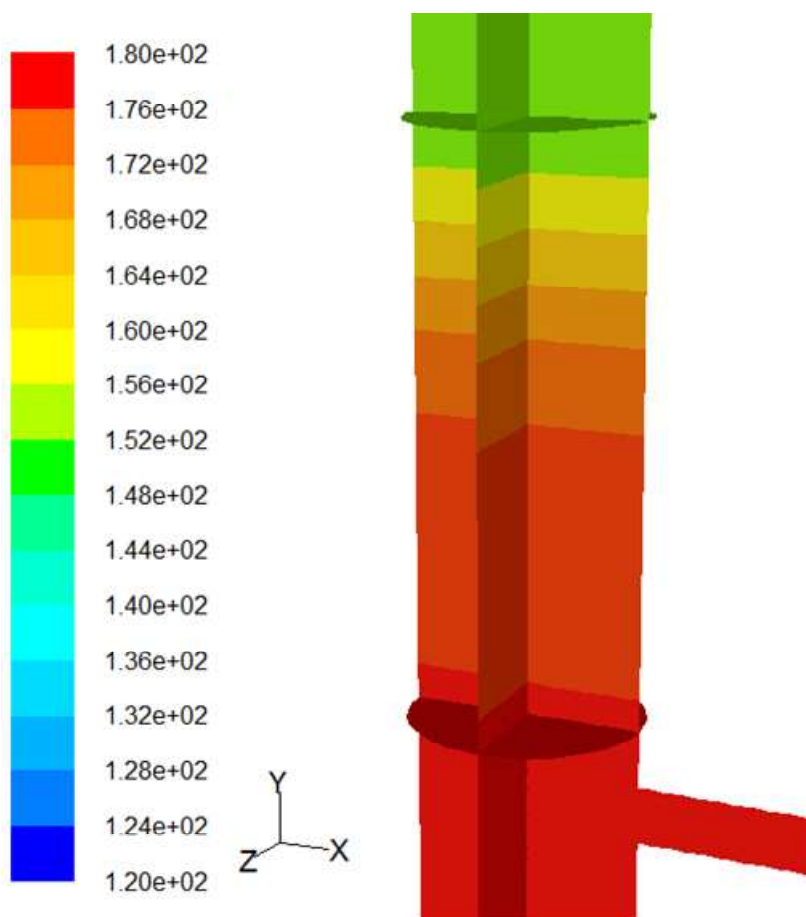
6.3.4. Souhrn

Tato kapitola byla věnována hydraulickým výpočtům porézních objemových zón, které tvoří spolu s volným objemem výpočetní model. Dle postupu uvedeného v kapitolách 6.3.1 a 6.3.2 byly vypočteny tlakové ztráty, viz Tab. 7. Porovnání tlakových ztrát dle výpočtu ve FLUENTU je uvedeno na Obr. 4.

Tlakové ztráty	
Rošt	3 Pa
Palivové lože	9 Pa

Tab. 7: Tlakové ztráty roštu a palivového lože vypočtené podle postupu uvedeného v kapitolách 6.3.1 a 6.3.2.

Porovnání tlakových ztrát vypočtených pro zjednodušený 3D model ve FLUENTU:



Obr. 4: Průběh tlaku [Pa] v řezu řešeného zjednodušeného 3D modelu. Horizontální kruhové řezy označují rošt a vrch palivového lože.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

6.4. Modelování procesu spalování

Palivo jako látka podléhající chemickým reakcím ukrývá určité množství chemické energie, která je spalováním přeměněna v energii tepelnou. Oxidace spalitelných složek je dosažena za určité teploty a za dostatečného množství přivedeného kyslíku. Z hlediska vztahu mezi chemickými vzorci látek a jejich hmotnostním zastoupením jsou do FLUENTU zadány stechiometrické koeficienty dle rovnic (6) až (9) kapitoly 5.2.1.

Pro tento zjednodušený 3D výpočet je použit model Eddy Dissipation (model disipace turbulentních vírů), který předpokládá vzájemné ovlivňování mezi turbulentí a chemickým složením směsi. [24]

6.5. Specifikace zón uvnitř lože

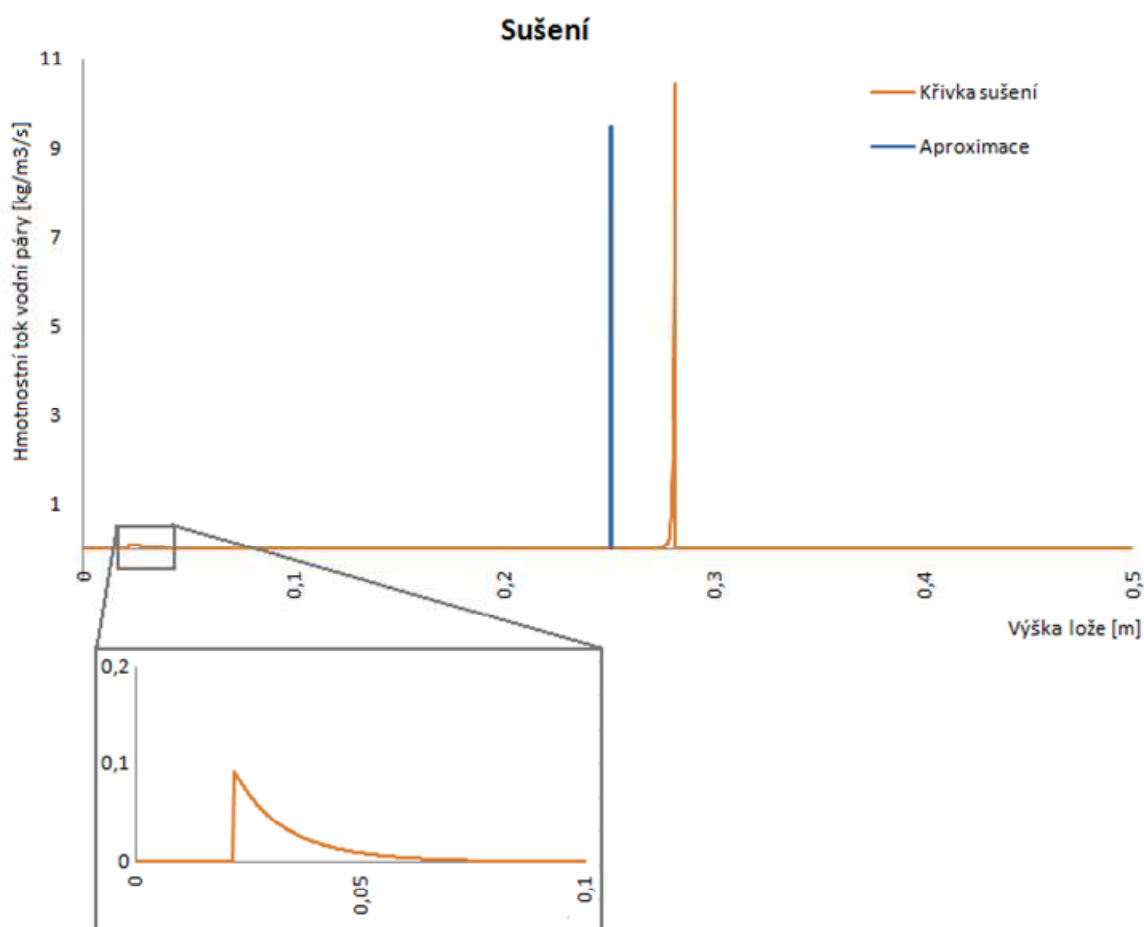
Před konkrétním popisem jednotlivých zón palivového lože je nutné stanovit jejich geometrii. Během spalování se palivo rozkládá na jednotlivé látky, které jsou charakterizovány svými hmotnostními toky, tzv. zdrojovými členy. Detailní průběh hmotnostních toků během celého spalovacího procesu (rozumí se tím po celé výšce lože) je převzat z výsledků detailního 1D modelu palivového lože, popsáno v [8]. Tento průběh je aproximován zónou, která má konstantní objemový tok, jehož hodnota je použita pro výpočet řešené úlohy, neboť FLUENT přímo umožňuje zadat hodnotu zdrojového členu do konkrétní objemové zóny.

6.5.1. Aproximace rozměru objemových zón

Nejdříve je nutné hodnoty zdrojových členů aproximovat, aby byl získán interval pro vytvoření oddělené objemové zóny. Níže jsou uvedeny průběhy hmotnostních toků v závislosti na výšce lože. V místě, kde aproximované křivky protínají vodorovnou osu, se nachází hranice jednotlivých objemových zón v modelu.

Během fáze sušení se začíná vlhkost odpařovat těsně nad ložem a průběh hmotnostního toku vodní páry se na závěr prudce zvyšuje. Skutečnost, že vypařování vlhkosti začíná v malé výšce nad roštem, není z křivky objemového toku v celkovém grafu příliš dobře znatelná a posunutí aproximované křivky může být pro čtenáře matoucí. Proto je vedle grafu znázorněno přiblížení oblasti těsně nad ložem, kde lze dobře rozpoznat počáteční hodnotu hmotnostního toku vodní páry, která je příčinou posunutí aproximované křivky.

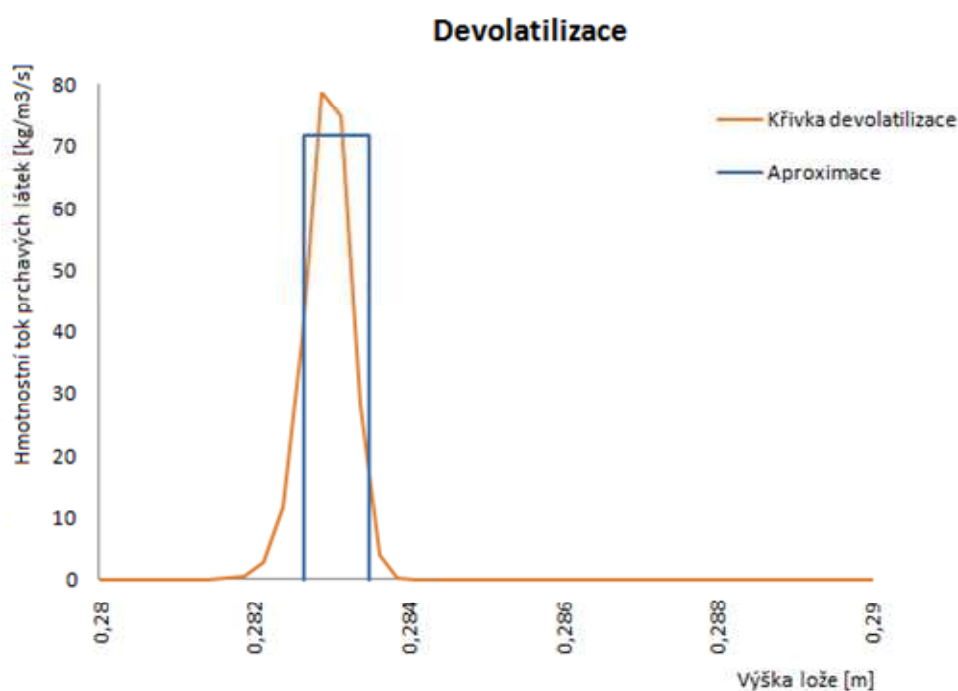
DIPLOMOVÁ PRÁCE



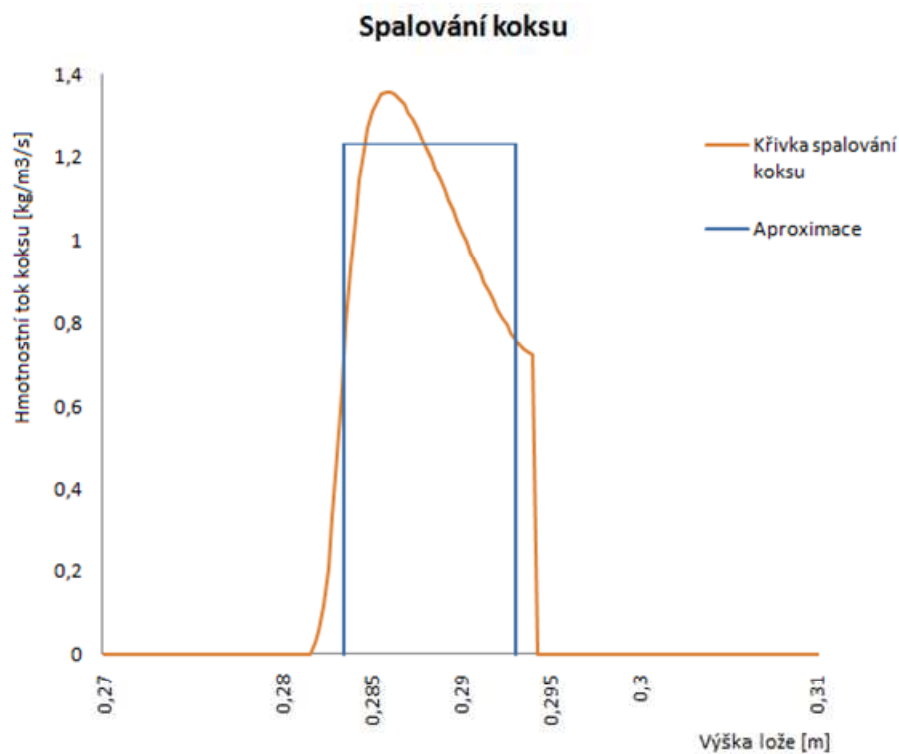
Graf 1: Křivka fáze sušení. Funkční závislost hmotnostního toku vodní páry [$\text{kg/m}^3/\text{s}$] na výšce lože [m].

V grafu 2 a 3 jsou uvedeny aproximace hmotnostních toků ve fázi devolatilizace a ve fázi spalování koksu. Pro lepší znázornění je na horizontální ose grafu zobrazena zvětšená oblast lože, ve které se konkrétní děj odehrává.

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Graf 2: Křivka devolatilizace.
Funkční závislost hmotnostního toku prchavých látek [$\text{kg/m}^3/\text{s}$] na výšce lože [m].



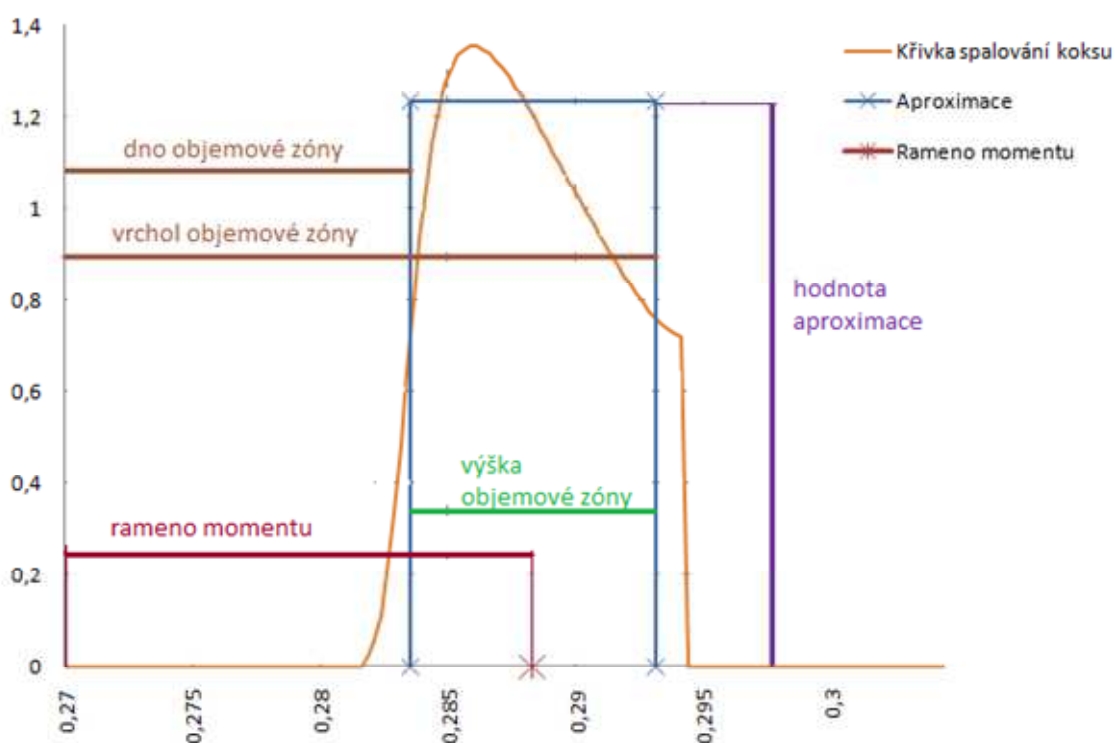
Graf 3: Křivka hmotnostního toku při spalování koksu. Funkční závislost hmotnostního toku koksu [$\text{kg/m}^3/\text{s}$] na výšce lože [m].

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Postup aproximace je následující:

- je zvolena hodnota aproximace v % (maximum aproximované funkce)
- je vypočten integrál funkce
- je vypočten moment funkce.

Podílem momentu a integrálu je získáno rameno těžiště funkce. Podílem integrálu a známé hodnoty aproximovaného maxima je získána výška vrstvy (geometricky se jedná o výpočet strany obdélníka při známých hodnotách jeho obsahu a zbývajících strany.). Geometrické znázornění je uvedeno na Obr. 5 pro konkrétní křivku hmotnostního toku koksu.



Obr. 5: Využití aproximace funkční závislosti objemových toků na výšce lože při zjišťování polohy objemových zón.

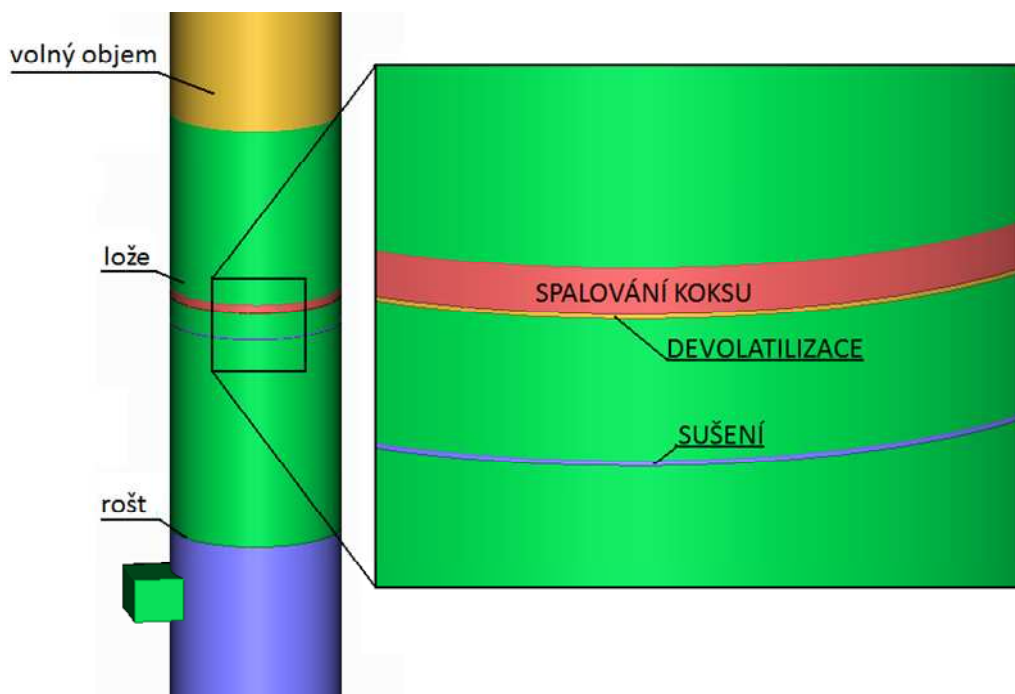
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konkrétní hodnoty objemových zón jsou uvedeny v Tab. 8 pro aproximaci 91%. Hodnota 91% se při záměru zachovat určitou maximální hodnotu průběhu jevila jako nejvhodnější z hlediska návaznosti zóny devolatilizace a zóny spalování koksu. Číselné hodnoty intervalů jsou uvedeny ve vztahu k výchozí nulové poloze roštu.

Specifikace zón uvnitř lože		
Zóna	Interval [mm]	
	Počátek	Konec
Sušení	250,877	251,841
Devolatilizace	282,656	283,497
Spalování koksu	283,500	293,137

Tab. 8: Intervaly aproximovaných zón vztahených k poloze roštu.

Pro celkovou představu o poloze jednotlivých zón v loži slouží Obr. 6.



Obr. 6: Poloha jednotlivých zón ve výřezu 3D modelu řešeného reaktoru.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

6.5.2. Zdrojové členy

Zjednodušený výpočtový 3D model, řešený v této úloze, uvažuje celkem 7 zdrojových členů. Konkrétně je to vodní pára, dehet, metan, vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a kyslík. Sloučeniny jsou včetně svých fyzikálních vlastností převzaty z databáze FLUENTU s výjimkou dehtu. Ten je nově zadán do výpočtu jako sloučenina s chemickým vzorcem $C_{1,6036}H_{6,1138}O_{1,6387}$ včetně parametrů převzatých z práce Ing. Juřeny popsané v [8]. Vlastnosti dehtu jsou uvedeny v Tab. 9:

Specifikace dehtu		
Chemický vzorec	Molární hmotnost	Jednotka
$C_{1,6036}H_{6,1138}O_{1,6387}$	51,641	mol
	Výhřevnost	
	19 933,288	kJ/kg
	Spalné teplo	
	22 539,114	kJ/kg

Tab. 9: Specifikace dehtu.

Zdrojové členy jsou rozděleny do tří skupin podle lokalizace jejich výskytu. Fáze sušení obsahuje jeden zdrojový člen – vodní páru. Fáze devolatilizace obsahuje všechny prchavé látky – metan, vodík a dehet. Podle průběhu hmotnostních toků je do tohoto intervalu zahrnut i dílčí hmotnostní tok CO a CO₂. Pro fázi spalování koksu jsou jako zdrojové členy určeny CO, CO₂ a O₂, který je při spalování spotřebováván. Ze stejných důvodů jako pro fázi devolatilizace jsou také do fáze spalování koksu zahrnuty dílčí hmotnostní toky prchavých látek.

Ve fázi sušení je při vypařování spotřebováno latentní teplo pro přeměnu kapalné fáze na plynnou. Toto množství energie je vyčísleno v rovnici

$$e_{\text{evap}} = q_{\text{latent}} r_{H_2O} \quad , \quad (20)$$

kde

e_{evap} [W/m ³]	je energie potřebná pro odpaření vlhkosti,
q_{latent} [J/kg]	je latentní teplo,
r_{H_2O} [kg/m ³ /s]	je hmotnostní tok vodní páry.

Během spalování koksu je jako produkt exotermické reakce uvolňována tepelná energie, jejíž hodnota je získána z rovnice

$$e_{\text{char}} = q_{\text{char}} r_{\text{char}} \quad , \quad (21)$$

kde

e_{char} [W/m ³]	je energie uvolněná během oxidace,
q_{char} [J/kg]	je teplo uvolněné během oxidace,
r_{char} [kg/m ³ /s]	je hmotnostní tok koksu.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypočtené hodnoty energií jsou přiřazeny odpovídajícím zdrojovým členům v zóně sušení a v zóně spalování koksu.

Číselné hodnoty zdrojových členů, energie spotřebované na změnu skupenství vody a energie uvolněné během spalování koksu jsou uvedeny v Tab. 10.

Zóna	Zdrojový člen	Hodnota	Jednotka
Sušení	H ₂ O	9,504	kg/m ³ /s
Devolatilizace	CH ₄	0,243	kg/m ³ /s
	H ₂	1,419	kg/m ³ /s
	Dehet	51,246	kg/m ³ /s
	CO	35,821	kg/m ³ /s
	CO ₂	28,683	kg/m ³ /s
Spalování koksu	CH ₄	0,021	kg/m ³ /s
	H ₂	0,124	kg/m ³ /s
	Dehet	4,488	kg/m ³ /s
	CO	3,137	kg/m ³ /s
	CO ₂	2,512	kg/m ³ /s
	O ₂	-2,784	kg/m ³ /s
	Energie	Hodnota	Jednotka
Sušení		-23 156 688	W/m ³
Spalování koksu		31 520 342	W/m ³

Tab. 10: Hodnoty zdrojových členů a energií pro jednotlivé zóny v loži

6.6. Přenos tepla

Podle 2. termodynamického zákona dochází k přenosu tepelné energie pouze za přítomnosti teplotního gradientu, přičemž přenos tepla se děje ve směru klesající teploty. Základní mechanismy přenosu tepla mohou být rozděleny na základě jejich principu na přenos tepla kondukcí, konvekcí a radiací. Přenos tepla kondukcí a konvekcí je řízen společným principem – energie je přenášena atomárním nebo molekulárním pohybem. Jinými slovy, přenos tepla se děje určitou látkou, ať už se jedná o pevné těleso nebo proudící tekutinu. [29]

DIPLOMOVÁ PRÁCE

6.6.1. Přenos tepla kondukcí

Přenos tepla kondukcí je dán nahodilým pohybem částic s rozdílnou hodnotou energie. Tento jev je někdy označován také jako energetická difuze. V tekutinách je tepelný přenos zprostředkován molekulami, v pevných látkách pak prostřednictvím atomů. Mechanismus vedení tepla se řídí Fourierovým zákonem [29], podle kterého je lineární průběh přenosu tepla v pevné stěně popsán jako

$$\mathbf{q} = -\lambda_{\text{cond}} \text{grad} T, \quad (22)$$

kde

\mathbf{q} [W/m²] je vektor měrného tepelného toku
 λ_{cond} [W/(mK)] je tepelná vodivost,
 $\text{grad } T$ [K/m] je teplotní gradient.

Při řešení výpočtu zjednodušeného 3D modelu je testován přenos tepla kondukcí. Podle práce [26], ze které byly převzaty také rozměry počítaného modelu, je reaktor vyroben z inconelu (slitina niklu vyznačující se vysokou tepelnou odolností, jejíž charakteristiky jsou převzaty z [30]). Parametry stěn reaktoru, které byly zadány do FLUENTU, jsou uvedeny v Tab. 11:

Vlastnosti stěn reaktoru			
Parametr	Jednotka	Hodnota	Popis
t_w	m	0,01	Tloušťka stěny
$C_{p\text{inc}}$	J/kg/K	418,7	Měrná tepelná kapacita
ρ_{inc}	kg/m ³	8 360,0	Hustota
λ_{inc}	W/m/°C	13,6	Tepelná vodivost

Tab. 11: Vlastnosti stěn reaktoru vyrobeného z inconelu [26],[30]

6.6.2. Přenos tepla konvekcí

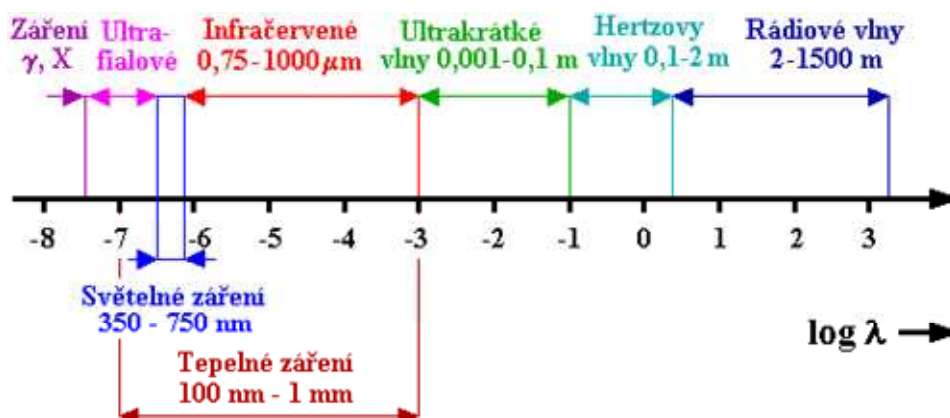
Konvekce je tvořena superpozicí dvou základních pochodů: nahodilým pohybem molekul (difuzí) a makroskopickým pohybem označovaným jako advekce, přičemž dominantním mechanismem přenosu tepla je advekce. Míra přestupu tepla je rozdílná v závislosti na režimu proudění. Pro turbulentní proudění jeho hodnota prudce narůstá vlivem dodatečného přenosového mechanismu – pohybem vírů, které zintenzivňují přenos tepla. Ve FLUENTU se přenos tepla konvekcí počítá přímo z konvektivního členu. Konvektivní člen lze nalézt v kapitole 4.1.3 v rovnici (13) pro zákon zachování energie.

6.6.3. Přenos tepla radiací

Mechanismus přenosu tepla elektromagnetickým zářením je zcela odlišný než dosud uvedené mechanismy, neboť přenos tepla není prováděn žádným zprostředkujícím médiem. Energie je přenášena ve formě diskretních kvant (tento fakt byl poprvé formulován v roce 1900 Maxem Planckem, který popsal skutečnost, že energie vyzařovaná nebo pohlcovaná jednotlivými atomy zahřátého tělesa nemůže mít spojitou formu, ale je vyzařována a pohlcována v konečných dávkách energie – v kvantech). Každá částice, která disponuje určitou energií, hmotností a hybností je považována za kvantum. V závislosti na zvyšování absolutní teploty mají kapaliny a některé plyny (například vodní pára a uhlovodíky) schopnost vyzařovat tepelnou energii. [29]

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tepelné záření je charakterizováno převážně infračerveným zářením, jak je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7: Spektrum elektromagnetického záření [31]. Na horizontální ose je vyneseno logaritmus vlnové délky záření λ [m].

Ideální tepelný zářič, označovaný jako černé těleso, vyzařuje tepelnou energii úměrně čtvrté mocnině teploty povrchu pevného tělesa podle Stefan-Boltzmannova zákona [29]:

$$E_0 = \sigma T^4, \quad (23)$$

kde

E_0 [W/m ²]	je emisivita ideálního černého tělesa,
T [K]	je teplota povrchu tohoto tělesa,
σ [W/m ² K ⁴]	je Stefan-Boltzmannova konstanta,
	$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{K}^4 \text{)}.$

Pokud je povrch reálného tělesa vystaven radiaci, mohou nastat tři možné situace: část záření se po dopadu na povrch odrazí (odrazivost bude značena jako r_r), část záření je pohlcena (absorptance bude značena jako a_r) a část záření je přenesena povrchem, na který dopadá (propustnost bude značena jako t_r). Celkové vyzářené teplo bude tedy dáno součtem těchto tří možných situací [29]:

$$Q_{rad} = r_r Q_{rad} + a_r Q_{rad} + t_r Q_{rad}, \quad (24)$$

$$r_r, a_r, t_r \in \langle 0; 1 \rangle,$$

kde

r_r [-]	je částečná reflektance (odrazivost) tepelného záření,
a_r [-]	je částečná absorptance (pohltivost) tepelného záření,
t_r [-]	je částečná propustnost tepelného záření.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Teplo vyzářené stěnami kotle charakterizují členy reflektance a absorptance, částečná propustnost tepelného záření je nulová. Podle Kirchhoffova zákona je energie absorbovaná tělesem rovna energii tělesem vyzářené. Vzhledem k ideálnímu černému tělesu je emisivita ε reálného tělesa rovna [29]

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}. \quad (25)$$

Protože reálné těleso vyzařuje nespojité spektrum vlnových délek, byl ustaven model tzv. šedého tělesa, který představuje určitou aproximaci chování reálného tělesa a je popsáno spojitým spektrem záření.

Ve zjednodušeném 3D modelu reaktoru, řešeném v této úloze, představuje tepelný zdroj zářič umístěný na vrcholu spalovací komory. Vlastnosti zářiče jsou převzaty z detailního 1D modelu, popsaného v [8]. Číselné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 12:

Vlastnosti povrchu tepelného zdroje			
Parametr	Jednotka	Hodnota	Popis
T	K	1173,15	Teplota povrchu
ε_R	-	0,9	Emisivita

Tab. 12: Vlastnosti povrchu tepelného zdroje

Při výpočtu radiace ve FLUENTU je uvažována směs šedých plynů, označovaná jako WSGGM (z anglického weighted-sum-gray-gases-model). Při výpočtu radiace vychází FLUENT ze střední délky paprsků, vypočtených na základě rozměru objemové zóny. Pro simulaci zjednodušeného 3D modelu je zvolen absorpční koeficient závislý na složení směsi (lokální hodnota absorptance je funkcí lokálního hmotnostního zlomku vodní páry a oxidu uhličitého). Z hlediska přenosu tepla radiací je pro výpočet zvolen model diskretních souřadnic (Discrete Ordinates model), který při výpočtu radiace využívá konečného počtu prostorových úhlů přidružených k vektorovému směru, zafixovanému v prostorových souřadnicích. Tento model řeší takový počet přenosových rovnic, kolik vektorových směrů uvažuje. Metoda řešení má stejný princip jako metoda, kterou se ve FLUENTU řeší proudění a zákony zachování energie. Z hlediska správné funkce spalovacího reaktoru je žádoucí, aby byl v prostoru pod roštem během spalování minimální radiační tok. Z tohoto důvodu byla vytvořena uživatelská funkce (UDF), ve které jsou objemovým zónám vloženy přiřazena identifikační čísla, pod kterými je rozeznává FLUENT. Následně jsou těmto zónám přiřazeny hodnoty absorpčního koeficientu. Za účelem minimalizace radiačního toku v prostoru pod roštem jsou testovány varianty s různými hodnotami absorpčních koeficientů a následně vyhodnocen radiační tok v prostoru pod roštem. [22]

6.7. Souhrn

V této kapitole byl popsán postup vytvoření zjednodušeného 3D výpočtového modelu, v němž se praktické výpočty prolínají s teoretickouází, neboť jinak by nebylo možné stavbu zjednodušeného 3D modelu souvisle popsat. Jako výsledek této práce je v následující kapitole uveden popis kroků, které je třeba při přípravě tohoto modelu uskutečnit.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

7. Doporučený postup pro vytvoření zjednodušeného 3D modelu

Pro provedení zjednodušeného výpočtu spalování na roštu vyplývá z postupu uvedeného v kapitole 6 doporučení následujících kroků:

Krok I.

V první fázi je nutné zpracovat vstupní data, která vychází z výpočtů popsaných v publikaci [8]. Tento krok zahrnuje aproximaci průběhu hmotnostních toků zdrojových členů v závislosti na výšce lože. Rovněž jsou vypočteny tlakové ztráty na roštu a v loži, a z nich plynoucí ztrátové koeficienty pro simulaci ve FLUENTU.

Následuje definování vstupních (hmotnostní tok, teplota, koncentrace složek primárního vzduchu) a výstupních (předpokládaná teplota, odhad složení vystupujících spalin) okrajových podmínek ve FLUENTU. Dále jsou z databáze FLUENTU zvoleny zdrojové členy a složky primárního vzduchu, které jsou během výpočtu uvažovány (O_2 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 , H_2 , CH_4 a dehet), včetně nadefinování vlastností dehtu.

V této fázi může být spuštěn první výpočet, tzv. studený běh. Spalovací komora je pouze proprouděna vstupujícím vzduchem, nedochází k přenosu energie a tedy ani k nárůstu teploty. Tento výpočet slouží jako kontrola nastavení výchozích podmínek a kontrola správného směru proudění spalovací komorou.

Krok II.

Zdrojové členy jsou přiřazeny do aproximovaných zón sušení, devolatilizace a koksu. Fázi sušení je přiřazen záporný energetický člen v důsledku spotřeby latentního tepla na změnu fáze. Fázi spalování uhlíkatých sloučenin je přiřazen kladný energetický člen v důsledku exotermních reakcí uhlíku a kyslíku.

Nyní může být spuštěn druhý výpočet, během kterého je umožněn přenos látek během spalování. Po tomto výpočtu je zkontrolováno, zda průběh hmotnostních koncentrací odpovídá předpokladu (tj. pro aproximovanou zónu sušení nárůst koncentrace vodní páry, pro fázi devolatilizace zvýšení koncentrace prchavých látek a pro fázi spalování koksu úbytek kyslíku).

Krok III.

V dalším kroku jsou stechiometricky zadány reakce, které popisují děj v prostoru nad ložem.

Třetí výpočet uvažuje průběh chemických reakcí, přičemž reakční mechanismus je zapnut v zóně nad palivovým ložem, aby bylo dosaženo co největší podobnosti s prací popsanou v publikaci [8], ze které je při přípravě modelu vycházeno.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Krok IV.

Následně je nadefinován tepelný zdroj u vrcholu spalovací komory. Stěně na vrcholu spalovací komory je přiřazena absolutní teplota a emisivita.

Čtvrtý výpočet radiace je proveden pro model DO a je při něm zkontrolováno očekávané rozložení teplot.

Krok V.

Nyní může být vytvořena uživatelská funkce (UDF), která řídí průběh radiace ve spalovací komoře.

V tomto kroku jsou testovány varianty radiačního modelu DO řízeného funkcí UDF (viz kapitola 6.6.3) bez uvažovaného vedení tepla ve stěně reaktoru. Varianta, která je vyhodnocena jako nejvhodnější z hlediska tepelného toku nacházejícího se v oblasti pod roštem, je provedena v kombinaci s modelem vedení tepla ve stěně.

8. Vyhodnocení výpočtu zjednodušeného 3D modelu

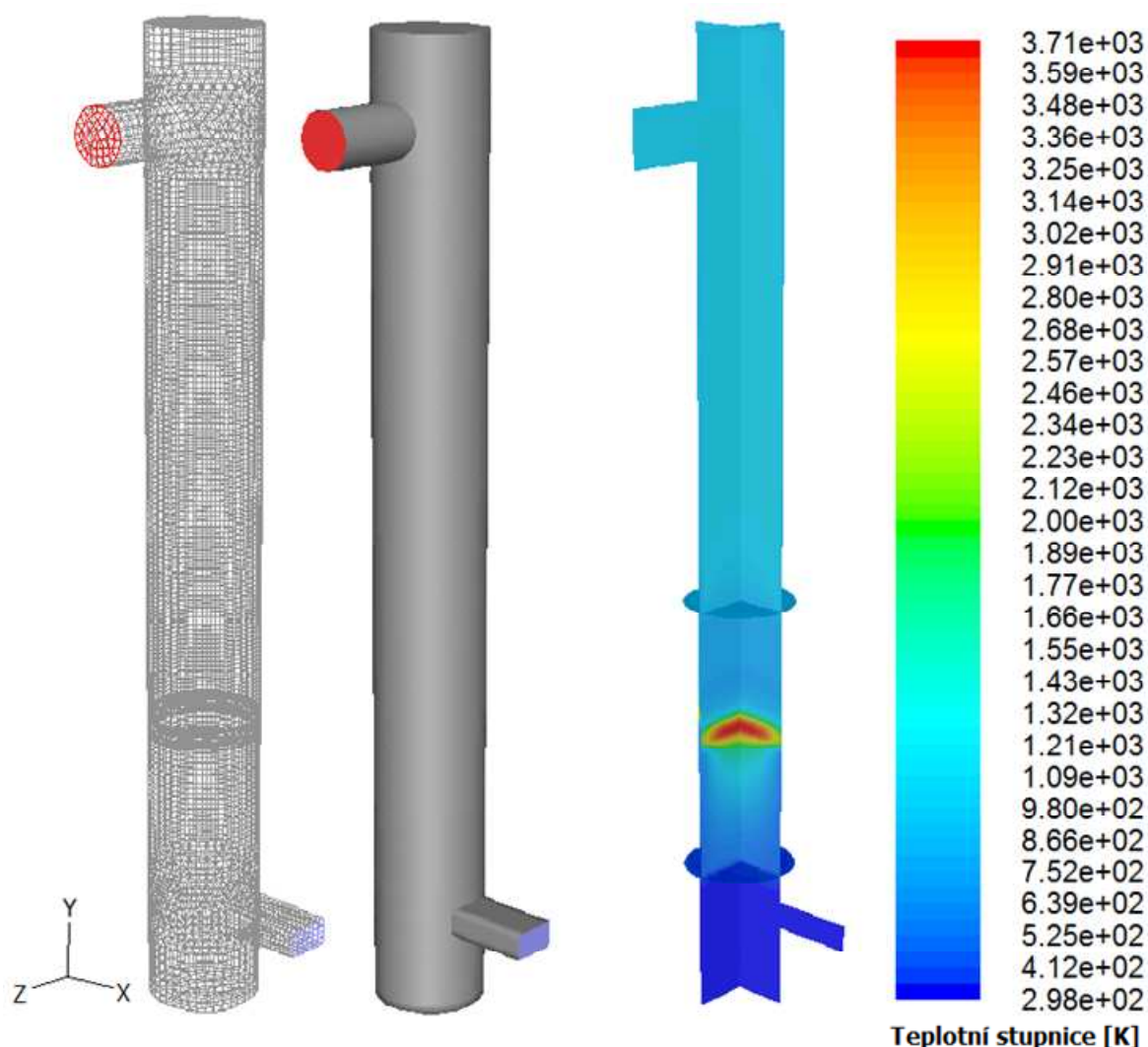
V této kapitole je kromě zhodnocení základního nastavení výpočtu vyhodnoceno několik variant výpočtu radiace s funkcí UDF dle hodnoty radiačního tepelného toku v oblasti pod roštem.

Z hlediska přenosu tepla vedením je výpočet proveden ve dvou variantách. Nejdříve je provedena simulace procesu spalování bez uvažování vedení tepla ve stěně. Druhý způsob analyzuje tepelnou vodivost ve stěnách reaktoru a přibližuje tak situaci reálným podmínkám.

8.1. Základní nastavení výpočtového modelu

Správné nastavení výpočtu je ověřeno kontrolou teplot, jejichž hodnoty jsou dle dat, ze kterých je při tvorbě modelu vycházeno [8], na vstupu $298,15\text{ K}$ a na vrcholu spalovací komory $1173,15\text{ K}$. Dále je sledována očekávaná nízká teplota nespáleného paliva ležícího na roštu, nárůst teploty v zóně spalování koksu a teplota na vrcholu palivového lože, která je podle dat z výpočtu popsáno v [8] 1187 K . Na Obr. 8 je znázorněna výpočetní síť, celkový model reaktoru ve FLUENTU a řez ve dvou na sebe kolmých vertikálních rovinách, na nichž je znázorněn teplotní průběh. Teplotní průběh je uveden pro simulaci, jejíž nastavení odpovídá *Variantě IV.* uvedené v Tab. 13 v kapitole 8.2.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

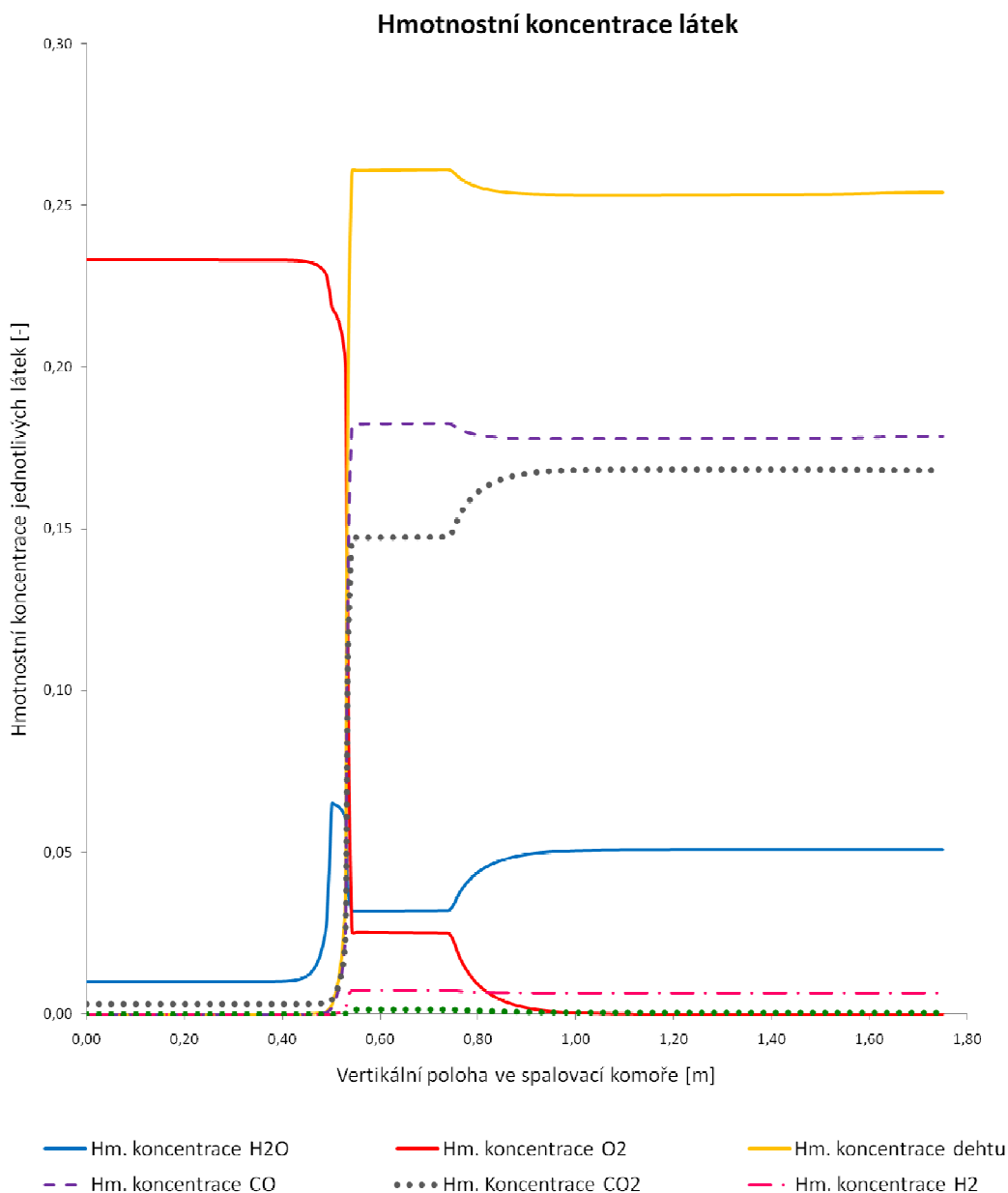


Obr. 8: Znázornění výpočetní sítě, celkového modelu a teplotního rozložení v řezu reaktoru. Horizontální řezy označují polohu roštu a vrch palivového lože.

Na tomto místě je nutné hledat příčinu vysoké teploty v zóně spalování koksu (dle teplotní stupnice zde dosahuje teplota hodnot $3\,710\text{ K}$). Takto vysoká teplota se dá vysvětlit postupem zvoleným při aproximaci, kdy bylo záměrem přiblížit se maximální hodnotě průběhu zdrojových členů. Jako důsledek vysoké procentuální hodnoty aproximace byly vypočteny úzké intervaly zón, ve kterých se odehrávají jednotlivé subprocesy. Při výpočtu energetických členů v jednotkách W/m^3 tedy zákonitě došlo k nárůstu hodnoty energetického členu. Například pro oblast spalování koksu byl dle dat z výpočtu uvedeného v [8] stanoven celkový tepelný výkon $9\,535,2\text{ W}$, avšak do aproximované zóny $3,025 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3$ byla hodnota energetického členu zadaného do FLUENTU $31\,520,3\text{ kW/m}^3$. Na závěr lze tedy konstatovat, že by bylo vhodné provést další výpočet s aproximací, kterou by byly obdrženy širší intervaly zaujímající větší prostor v celkovém objemu lože. Od takového výpočtu je možné očekávat, že výsledkem budou nižší teploty v zónách, kde dochází k uvolňování energie. Naopak v zóně sušení, kde dochází k odpařování vlhkosti a spotřebě tepelné energie na změnu fáze, lze očekávat nárůst teploty.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Z dat získaných ze simulace spalování v tomto zjednodušeném 3D modelu byl vytvořen přehled hmotnostních koncentrací jednotlivých látek účastnících se spalování po celé výšce spalovací komory, které odpovídají očekávanému průběhu, jak lze vidět v Graf 4.



Graf 4: Průběh hmotnostních koncentrací látek účastnících se procesu spalování v reaktoru, získaný během simulace zjednodušeného 3D modelu.

Z průběhu hmotnostních koncentrací v Graf 4 je v místě křížení křivek dobře znatelná zóna devolatilizace a zóna spalování koksu. Hmotnostní koncentrace spalitelných složek roste na úkor hmotnostní koncentrace vodní páry a kyslíku (tj. oxidačních látek). Za oblastí křížení jednotlivých křivek se v místě jejich zlomu nachází vrchol lože a počátek reakcí v plynné fázi, během kterých je velice záhy spotřebován zbývající kyslík. Z tohoto průběhu je znatelný chybějící přívod sekundárního vzduchu, který by zajistil další pokles koncentrace dehtu a oxidu uhelnatého.

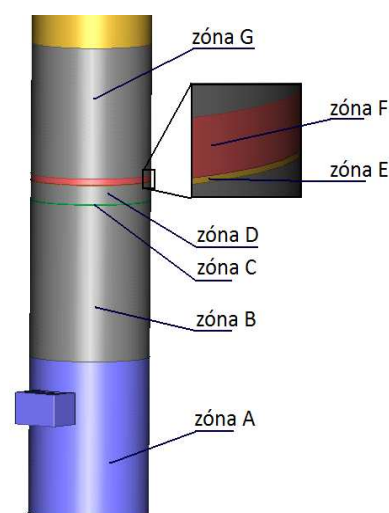
DIPLOMOVÁ PRÁCE

8.2. Vyhodnocení radiace

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, jedním z cílů této práce bylo testovat různé varianty výpočtu za účelem dosažení minimálního tepelného toku pronikajícího do prostoru pod roštem. Testování jednotlivých variant probíhalo za předpokladu, že vrstva nespáleného paliva pojme největší množství tepla - během výpočtu radiace byla tedy měněna hodnota absorpčních koeficientů v objemových zónách lože za současného sledování měrného tepelného toku v oblasti pod roštem. Následující tabulka uvádí sestupně seřazený přehled několika vybraných výpočtů radiačního toku pro různé hodnoty absorpčního koeficientu v uživatelské funkci (varianty výpočtu včetně UDF jsou přiloženy na CD), včetně srovnání tepelného toku v simulaci bez UDF.

Jednotlivé zóny vyznačené na Obr. 9 označují oblasti v modelu v následujícím pořadí:

- ✦ zóna A – oblast pod roštem
- ✦ zóna B – vrstva nespáleného paliva
- ✦ zóna C – sušení
- ✦ zóna D – oblast mezi fází sušení a devolatilizací
- ✦ zóna E – devolatilizace
- ✦ zóna F – spalování koksu
- ✦ zóna G – vrstva vyhořelého paliva



Obr. 9: Vyznačení jednotlivých zón modelu ve výpočtu radiace s UDF.

Zóna								Radiální tok pod ložem [W/m ²]
Variant	A	B	C	D	E	F	G	
Var. I.	bez UDF							13 441
Var. II.	10 ²	10 ¹⁴	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	3 590
Var. III.	10 ²	10 ¹⁸	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁸	3 522
Var. IV.	10 ²	10 ¹⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	2 443
Var. V.	10 ²	10 ¹⁸	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	2 443

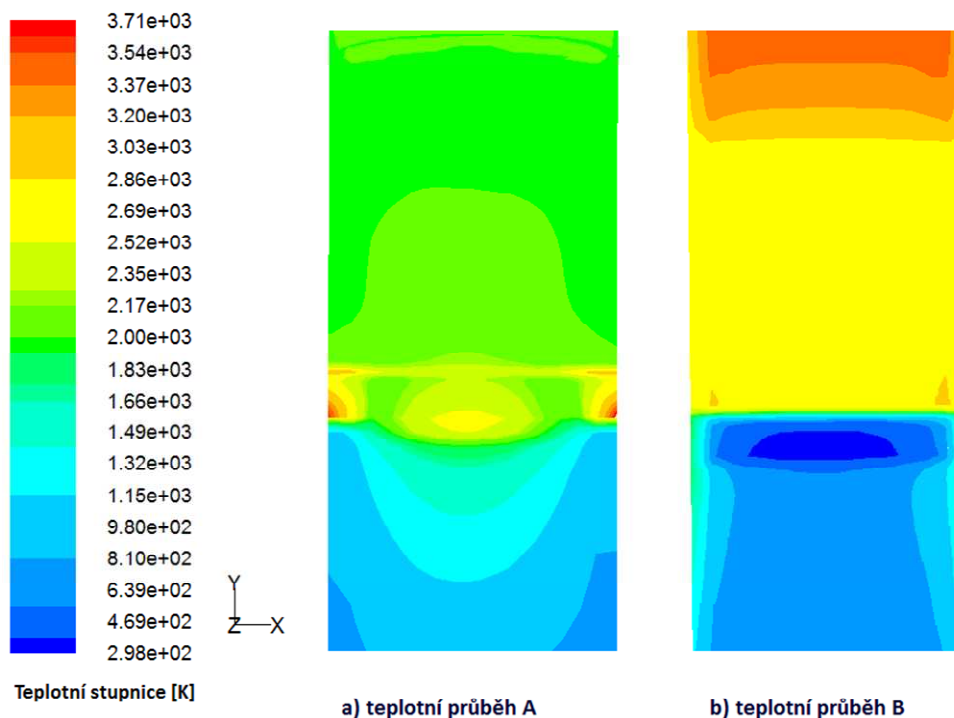
Tab. 13: Varianty výpočtu radiace za účelem minimalizace tepelného toku pronikajícího vrstvou nevyhořelého paliva do prostoru pod roštem.

Dle výsledku uvedených v Tab. 13 lze pro další výpočty doporučit hodnoty absorpčních koeficientů v UDF podle variant IV. a V.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

8.3. Vliv vedení tepla stěnou reaktoru

Pro vyhodnocení vlivu vedení tepla stěnou reaktoru byla do původního nastavení simulace přiřazena tloušťka stěn $0,01\text{ m}$ a emisivita $0,9$.



Obr. 10: Porovnání vlivu vedení tepla ve stěně pro oblast spalování koksu. Teplotní průběh A znázorňuje vliv vedení tepla ve stěně. Teplotní průběh B znázorňuje teplotní průběh bez uvažovaného vedení tepla ve stěně.

Z obrázku zaměřeném na detail zóny spalování koksu je patrné, že teplotní průběh A ve výpočtu, který uvažuje vliv tepelné izolace (tedy vedení tepla stěnou reaktoru), ukazuje na odvod tepla z jádra ke stěnám reaktoru.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

9. Závěr

Jedním z cílů této diplomové práce mělo být seznámení se stavem problematiky výpočtového modelování roštových kotlů. To bylo provedeno v kapitole 3, přičemž byl kladen důraz na rozlišení modelů, které se zabývají palivovým ložem a modelů, které zkoumají proces spalování ve volném objemu nad ložem.

Hlavní část práce byla věnována úkolu sestavit zjednodušený výpočtový 3D model experimentálního reaktoru. Pro tuto úlohu byla využita data z detailního 1D modelu, popsaného v publikaci [8]. Jednotlivé kapitoly obsahují vždy stručný teoretický základ řešení problematiky následovaný výpočtem, který vede ke stanovení řady veličin a koeficientů nezbytných pro nastavení simulace ve výpočtovém software FLUENT. Po sestavení zjednodušeného výpočtového modelu proběhla dlouhá řada testovacích výpočtů, které pomohly odhalit některé chybně zadané parametry. Výsledkem této diplomové práce je fungující výpočtový model, jehož výstupy jsou prezentovány v předchozí kapitole. Kromě rozložení teplotního profilu byla graficky zpracována data hmotnostních koncentrací jednotlivých látek, získaná ze simulace ve FLUENTU. Z tohoto grafu, uvedeného v předchozí kapitole, je jasně patrný průběh jednotlivých fází spalování. Zároveň tento graf dává podnět ke zdokonalení tohoto výpočtového modelu, které by spočívalo v umístění vstupů sekundárního vzduchu do volného objemu spalovací komory.

Prvním důležitým závěrem této diplomové práce je nalezení vhodné hodnoty absorpčního koeficientu, kterým je pomocí UDF řízen přenos tepla zářením uvnitř lože. Výsledkem výpočtových simulací je stanovení hodnoty absorpčního koeficientu, při jehož použití je hodnota měrného radiačního toku v oblasti pod roštem 2, 44 kW/m^2 , což činí vzhledem k ploše, na kterou je tento radiační tok vztažen, 450 W . Tato hodnota radiačního toku představuje 18% hodnoty, která byla vypočtena simulací bez použití UDF, nicméně by bylo vhodné výsledek výpočtu porovnat s experimentálním měřením.

Další závěr této diplomové práce, vyhodnocení vlivu vedení tepla ve stěně reaktoru odpovídal očekávanému teplotnímu průběhu, tedy že se tepelný tok přesune z jádra ke stěnám reaktoru. Jak již bylo v předchozí kapitole diskutováno, hlavní vliv na velikost a intenzitu teplotních polí má aproximace objemových zón, která byla provedena za účelem zachování určité hodnoty maxima aproximované funkce.

Lze konstatovat, že diplomová práce naplnila všechny cíle zadání.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

10. Seznam použitých zdrojů

- [1] EU renewable energy policy. <<http://www.euractiv.com/en/energy/eu-renewable-energy-policy/article-117536>>. March 2007.
- [2] YIN, C.; ROSENDAHL, L. A.; KÆR, S. K. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 9 May 2008, 5, [cit. 2011-02-01]. From URL: <www.elsevier.com/locate/pecs>. ISSN 0360-1285.
- [3] HOLÝ, Tomáš: Přínosy vytápění biomasou z hlediska vlivu na životní prostředí. *Biom.cz* [online]. 2010-05-26 [cit. 2011-05-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/prinosy-vytapeni-biomasou-z-hlediska-vlivu-na-zivotni-prostredi>>. ISSN: 1801-2655.
- [4] YANG, Y.B., RYU, C., KHOR, A., YATES, NE., SHARIFI, V.N., SWITHENBANK, J. *Effect of fuel properties on biomass combustion*. Part II. Modelling approach—identification of the controlling factors. *Fuel* 2005;84:2116–30.
- [5] ZHOU ET AL., H. Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel* [online]. 2005, 84, [cit. 2011-02-25]. From URL: <ScienceDirect - Fuel : Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed>
- [6] JUŘENA, T.; RECMAN, M.; HÁJEK, J. *Simulation of biomass drying in fixed bed of experimental grate combustion reactor*. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, roč. 18, č. 1, s. 599-604. ISSN: 1974- 9791.
- [7] JUŘENA, T.; HÁJEK, J.: *Computational system for CFD simulation of drying and devolatilization of biomass in 1D experimental fixed bed reactor*, 56. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2009 (sborník příspěvků), pp.A4.8-16, ISBN 978-80-86059-51-8, (2009), Česká společnost chemického inženýrství článek ve sborníku akce: 56. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2009, Srní,19.10.2009-22.10.2009
- [8] JUŘENA, T., HÁJEK, J. 2011, *Energy considerations in cfd modelling of biomass combustion in an experimental fixed-bed reactor*, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 803-808. DOI: 10.3303/CET1125134
- [9] RYU, C., YANG, Y.B., NASSERZADEH, V., SWITHENBANK, J. *Thermal reaction modelling of a large municipal solid waste incinerator*. *Combust Sci Technol* 2004; 176:1891–907.
- [10] KÆR, SK. *Numerical modelling of a straw-fired grate boiler*. *Fuel* 2004;83: 1183–90.
- [11] THUNMAN, H., LECKNER, B. Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed. *Proc Combust Inst* 2005;30:2939–46.
- [12] KUIJK, H.A.J.A. van. *Grate furnace combustion : A model for the solid fuel layer* [online]. Eindhoven : Eindhoven University of Technology, 2008. 157 s. PhD Thesis. Eindhoven University of Technology. From URL: <<http://alexandria.tue.nl/extra2/200810900.pdf>>. ISBN 978-90-386-1285-0.
- [13] DONG, W., BLASIAK, W. *CFD modeling of ecotube system in coal and waste grate combustion*. *Energy convers manage* 2001;42:1887-96.
- [14] KLASON, T., BAI, XS. *Combustion process in a biomass grate fired industry furnace: a CFD study*. *Progr Comput Fluid Dyn* 2006;6:278–82.
- [15] BLASIAK, W., YANG, WH., DONG, W. Combustion performance improvement of grate fired furnaces using Ecotube system. *J Energy Inst* 2006;79:67–74.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

- [16] GRISELIN, N., BAI, X.S. Particle dynamics in a biomass-fired furnace—predictions of solid residence changes with operation. IFRF Combust J 2000, Article No. 200009. 30pp.
- [17] GOERNER, K., KLASSEN, TH. Modelling, simulation and validation of the solid biomass combustion in different plants. Progr Comput Fluid Dyn 2006;6:225–34
- [18] SCHARLER, R., OBERNBERGER, I. *Deriving guidelines for the design of biomass grate furnaces with CFD analysis—a new multifuel-low-NO_x furnace as example*. In: Proceedings of sixth European conference on industrial furnaces and boilers, vol. IV, Estoril-Lisboa, Portugal, April 02–05, 2002. p. 227–41.
- [19] HÁJEK, J. *Modelování s využitím CFD-I : Studijní materiál pro 2. stupeň magisterského studia*. Brno : VUT, 2008. 106 s.
- [20] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin. Fluent, CFX* [online]. Ostrava : VŠB-TU OSTRAVA, 2008 [cit. 2011-02-01]. From URL: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>. ISBN 2308-0300.
- [21] BENYAHIA et al. Summary of MFX equations 2005-4 [online]. July, 2007, [cit. 2011-02-12]. From URL: <<http://www.mfix.org/documentation/MfixEquations2005-4-3.pdf>>.
- [22] *FLUENT 12.0 Users Guide*, Fluent Inc., Lebanon, 2009
- [23] BAI, X.S.; GRISELIN, N.; KLASSEN, T. *CFD Modelling of Biomass Combustion in Small Scale Boilers*. Sweden : Lund Institute of Technology, 2002. 52 s.
- [24] WARNATZ, J; MAAS, U.; DIBBLE, R.W. *Combustion : Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. 256 s. ISBN 3-540-60730-7.
- [25] ERTESVAG, Ivar S.. *Turbulent Flow and Combustion : From turbulence theory to engineering tools*. Trondheim : NTNU, Trondheim, Norway, 2008. 284 s.
- [26] KUBISZ, P. *Návrh experimentálního reaktoru pro výzkum spalování biomasy v pevném loži*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.
- [27] MEDEK, J. *Hydraulické pochody*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. 337 s. ISBN 80-214-2640-3.
- [28] IDELCHIK, I.E. *Handbook of hydraulic resistance : Second edition, Revised and Augmented*. United States of America : Hemisphere Publishing Corporation, 1986. 625 s.
- [29] PAVELEK, M. *Termomechanika*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 280 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [30] *Metal Alloys* [online]. 2008 [cit. 2011-05-9]. Special Metals Corporation Group. Dostupné z WWW : <<http://www.specialmetals.com/products/inconelalloy601gc.php>>.
- [31] PAVELEK, M. *Energetický ústav : Odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. 2005, 2005 [cit. 2011-04-18]. Optika. Dostupné z WWW: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0201.htm>>.

Seznam příloh

Příloha č. 1: CD obsahující:

1) diplomovou práci v digitální podobě ve formátu pdf

- DP_Flokova_2011_text.pdf

2) diplomovou práci v digitální podobě ve formátu doc

- DP_Flokova_2011_text.doc

3) výpočty parametrů pro simulaci ve FLUENTU

- DP_Flokova_2011_vypocty.xls

4) složku s vybranými simulacemi 3D zjednodušeného modelu

-DP_Flokova_2011_simulace.zip